



**TUGAS AKHIR - TF141581**

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI PADA  
*PLATFORM SEMI-SUBMERSIBLE*  
MENGUNAKAN METODE *LINEAR*  
*QUADRATIC GAUSSIAN (LQG)***

**RIZA ARIS HIKMADIYAR**  
NRP. 2411 100 701

Dosen Pembimbing  
Dr.Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  
Prof. Ir. Eko B. Djatmiko, MSc. PhD

**JURUSAN TEKNIK FISIKA**  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015





**FINAL PROJECT - TF141581**

# **DESIGN OF STABILIZATION CONTROL IN SEMI-SUBMERSIBLE PLATFORM USING LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) METHOD**

**RIZA ARIS HIKMADIYAR**  
**NRP. 2411 100 701**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr.Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**  
**Prof. Ir. Eko B. Djatmiko, MSc. PhD**

**DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2015**



## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN SISTEM KENDALI PADA PLATFORM SEMI-SUBMERSIBLE MENGGUNAKAN METODE LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG)

#### TUGAS AKHIR

Oleh:

**RIZA ARIS HIKMADIYAR**  
**NRP. 2411 100 701**

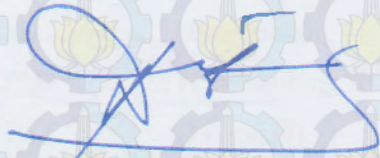
**Surabaya, Januari 2015**  
**Mengetahui/Menyetujui**

**Pembimbing I**



**Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.**  
**NIP. 1966011619890321001**

**Pembimbing II**



**Prof. Ir. Eko B. Djatmiko, MSc, PhD**  
**NIP. 19581226 198403 1002**

**Ketua Jurusan**  
**Teknik Fisika, FTI - ITS**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA**  
**NIP. 196503091990021001**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PERANCANGAN SISTEM KENDALI PADA PLATFORM SEMI-SUBMERSIBLE MENGGUNAKAN METODE LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG)

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**RIZA ARIS HIKMADIYAR**  
**NRP 2411 100 701**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T ..... (Pembimbing I)
2. Prof.Ir. Eko B Djatmiko, MSc.PhD ..... (Pembimbing II)
3. Fitri Adi Iskandarianto, ST, MT ..... (Penguji I)
4. Ir. Matradji, M.Sc ..... (Penguji II)
5. Dr. Dhany Arifianto, ST, M.Eng ..... (Penguji III)
6. Arief Abdurrahman, ST, MT ..... (Penguji IV)

**SURABAYA,**  
**JANUARI 2015**

## PERANCANGAN SISTEM KENDALI PADA PLATFORM SEMI-SUBMERSIBLE MENGGUNAKAN METODE *LINIER QUADRATIC GAUSSIAN (LQG)*

**Nama** : Riza Aris Hikmadiyar  
**NRP** : 2411100701  
**Jurusan** : Teknik Fisika, FTI - ITS  
**Pembimbing I** : Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT  
**Pembimbing II** : Prof. Ir. Eko B Djatmiko, MSc, PhD

### Abstrak

Teknologi kelautan berkembang sangat pesat dalam upaya mengeksplorasi dan mengeksploitasi sumber daya alam yang ada di laut terutama minyak bumi dan gas, sehingga banyak bangunan apung di laut untuk keperluan tersebut seperti semi-submersible rig. Kondisi lingkungan laut yang begitu ekstrem membuat semi-submersible rig harus handal dan kuat untuk menghadapi semua gangguan yang ada, salah satunya adalah dengan adanya kontrol stabilisasi pada semi-submersible rig agar dapat tetap kuat pada posisi yang telah ditentukan letaknya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendesain sistem kontrol stabilisasi pada *platform semi-submersible* menggunakan metode kontrol optimal *Linier Quadratic Gaussian (LQG)*. Kontrol LQG memiliki sifat yang *robust* terhadap *disturbance* pada frekuensi rendah dan tinggi. Berdasarkan Hasil performasi sistem kendali LQG secara keseluruhan, sistem mampu mengendalikan gangguan berupa variasi gelombang frekuensi rendah dan tinggi dan gangguan gelombang sudut 30 pada *seastate* 6. Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan penyimpangan maksimal sebesar 1.161 m untuk arah *sway* dan *yaw* sebesar 0.0256 radian hal ini masih diperbolehkan. Sedangkan kondisi dengan gangguan gelombang diperoleh bahwa sistem kontrol dapat mengikuti gangguan dengan sangat baik.

**Katakunci:** Gangguan gelombang, LQG, *platform semi-submersible*, kontrol stabilisasi







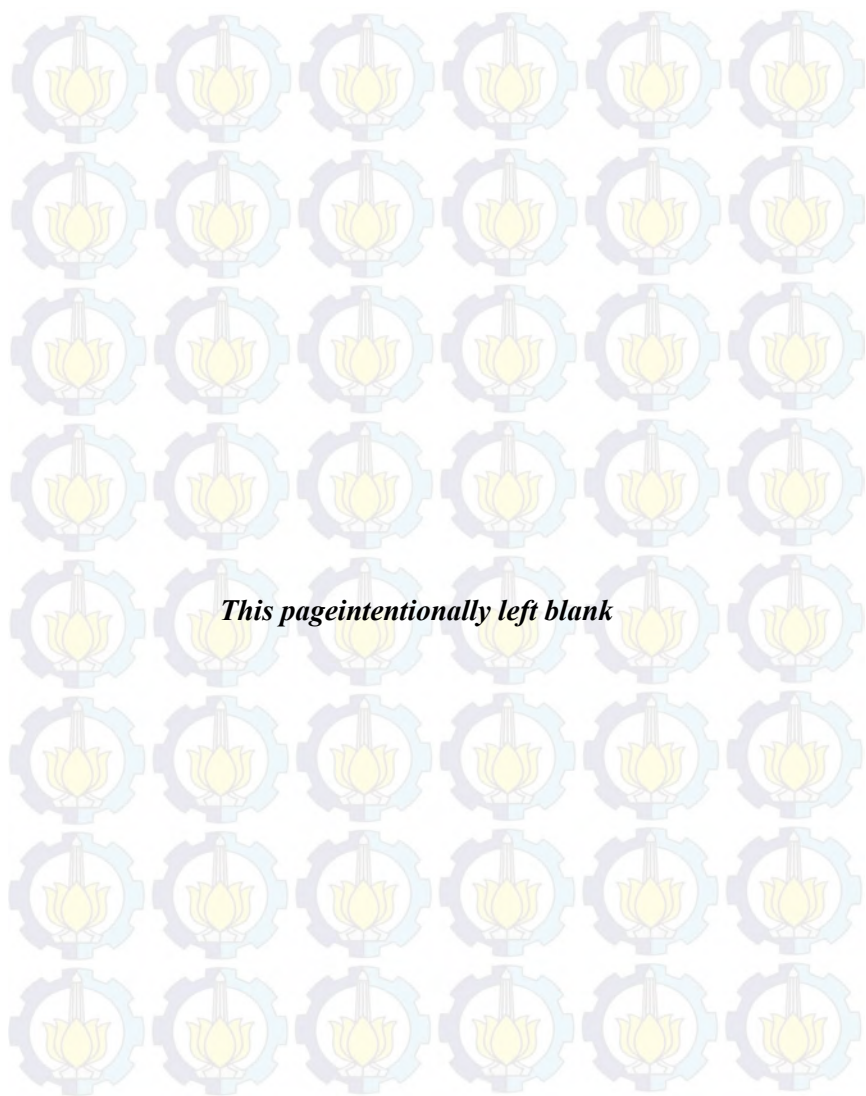
**DESIGN OF OPTIMAL CONTROL STABILIZATION IN  
PLATFORM SEMI-SUBMERSIBLE USING OPTIMAL  
CONTROL LINIER QUADRATC GAUSSIAN METHODS  
(LQG)**

**Name : Riza Aris Hikmadiyar**  
**NRP : 2411100701**  
**Departement : Engineering Physics – Faculty of Industrial  
Technology - ITS**  
**Supervisor I : Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT**  
**Supervisor II : Prof. Ir. Eko B Djatmiko, MSc, PhD**

***Abstract***

*Marine technology is growing very rapidly in an effort to explore and exploit the natural resources of the sea, especially oil and gas, so many buildings floating in the ocean for such purposes such as semi-submersible rig. Conditions are so extreme marine environments make the semi-submersible rig to be reliable and robust to deal with all the existing problems, one of which is the presence of stabilization control on a semi-submersible rig in order to remain strong at a predetermined position. The Purpose of this research is to design the control system stabilization in the semi-submersible platform using Linear quadratic optimal control method Gaussian (LQG). LQG control has robust nature of the disturbance at low and high frequencies. Based on the results performance LQG control system as a whole, the system is able to control the disturbances in the form of variations of low and high frequency waves and wave disturbance at an angle of 30 sea state 6. Based on simulation results, obtained a maximum deviation of 1.161 m for sway and yaw is 0.0256 radians it is still allowed. While the condition of the obtained wave disturbances that can follow interference control system very well.*

**Keywords: Wave disturbance, LQG, Platform, Semi-Submersible**



## KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Assalamualaikum Wr. Wb

Alhamdulillah, puji syukur Penulis haturkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, serta melimpahkan kesehatan dan petunjuk bagi Penulis. Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Sehingga Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta pembuatan laporan yang berjudul:

### **PERANCANGAN SISTEM KENDALI PADA PLATFORM SEMI-SUBMERSIBLE MENGGUNAKAN METODE KONTROL OPTIMAL *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* (LQG)**

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan bagi seorang mahasiswa untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan kali ini Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesainya laporan Tugas Akhir ini, khususnya kepada :

1. Abdul Fatah M (Ayahanda), Masruah (Ibunda), M.Iqbal Filayani (Kakak Tercinta) selaku keluarga penulis yang tiada hentinya memberikan doa dan juga semangat kepada penulis, dan juga KH. Mashari Tabshiruddin, KH. Cholil Dahlan serta Gus Sohib Muhammad yang juga selalu mendoakan dan mendidik penulis.
2. Ibu Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, MT dan Bapak Prof. Ir. Eko B Djatmiko, MSc. PhD selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu mengarahkan penulis dalam pengerjaan tugas akhir



3. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku dosen wali yang memberi motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika.
4. Bapak Ir. Ya'umar, M.T. selaku kepala Laboratorium Rekayasa Instrumentasi atas segala saran dan kemudahan.
5. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku ketua Jurusan Teknik Fisika, FTI – ITS.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmunya dengan ikhlas sehingga penulis dapat menyelesaikan kuliah sampai tugas akhir ini.
7. Teman-teman Teknik Fisika 2011, kakak-kakak F45++ dan adik-adik F47,F48,dan F49 serta rekan-rekan penulis yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
8. Teman-teman asisten Laboratorium Pengukuran Fisis atas segala keceriaan dan solidaritasnya.
9. Teman-teman CSSMORA 2011 yang selalu penulis banggakan.
10. Teman-teman Pondok Pesantren Salafiyah Syafiiyah al Idris yang selalu menemani penulis.

Penulis sangat menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk menyempurnakan laporan Tugas Akhir ini. Jazakumullah ahsanal Jaza'. Vivat TF!

Surabaya , Januari 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	<b>xxi</b>
 <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	 <b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
1.6 Sistematika Laporan .....	4
 <b>BAB II TEORI PENUNJANG</b> .....	 <b>5</b>
2.1 Model Dinamika Semi Submersible Rig Atlantis PQ Platform .....	5
2.2 Model Dinamika Gangguan Platform.....	14
2.2.1 Model Gangguan Gelombang dalam Frekuensi Rendah.....	14
2.2.2 Model Gangguan Gelombang dalam Frekuensi Tinggi.....	16
2.2.3 Model Gangguan Gelombang dengan arah sudut 30.....	17
2.3 Aktuator Platform.....	18
2.4 Kriteria Keterkendalian dan Keteramatan.....	18
2.5 Kontrol Optimal .....	19
2.6 Linear Quadratic Gaussian .....	20

<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Alur Penelitian .....	25
3.2 Studi Literatur .....	26
3.3 Pengambilan Data .....	26
3.4 Pemodelan Sistem Dinamik Platform.....	26
3.4.1 <i>Re model Platform Semi-submersible</i> .....	27
3.5 Validasi Keterkendalian dan Keteramatan Model State Space dari Plant.....	32
3.6 Pemodelan Gangguan Gelombang.....	33
3.7 Desain Sistem Kendali .....	34
3.8 Perancangan Kontrol Stabilisasi Platform.....	38
3.9 Pengujian Simulasi .....	38
3.9.1 <i>Open Loop</i> Sistem .....	39
3.9.2 <i>Closed Loop</i> Sistem .....	39
3.10 Analisa Performansi .....	40
3.11 Penyusunan Laporan .....	41
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>43</b>
4.1 Analisis Sistem Kontrol LQG .....	43
4.2 Analisis Hasil Uji Plant <i>Open loop</i> .....	43
4.3 Implementasi Sistem Kontrol LQG .....	45
4.4 Analisis Hasil Uji Platform <i>Closed loop</i> dengan Kontrol LQG.....	50
4.4.1 Analisis Hasil uji <i>Closed Loop</i> tanpa gangguan	50
4.4.2 Analisis uji <i>Sway</i> dan <i>Yaw</i> secara <i>Closed Loop</i> dengan gangguan .....	52
4.4.3 Analisis uji <i>Sway</i> dan <i>Yaw</i> dengan Gangguan gelombang arah sudut 30.....	54
4.4.4 Analisis uji <i>Sway</i> dan <i>Yaw</i> dengan Gangguan Gaussian.....	55
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>57</b>
5.1 Kesimpulan .....	57
5.2 Saran .....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	



<b>LAMPIRAN A</b>	<b>Pemodelan Dinamika <i>Platform</i></b> .....	A – 1
-------------------	---	-------

<b>LAMPIRAN B</b>	<b>Model Simulasi Kontrol <i>Open Loop</i> &amp; <i>Closed Loop</i></b> .....	B – 1
-------------------	---	-------



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Enam Derajat Kebebasan Kendaraan Laut	7
<b>Tabel 2.2</b>	Variabel-variabel normalisasi untuk <i>Bis System</i>	12
<b>Tabel 2.3</b>	Deskripsi Laut	14
<b>Tabel 3.1</b>	Algoritma perancangan <i>regulator</i>	36
<b>Tabel 3.2</b>	Algoritma perancangan <i>estimator</i>	37
<b>Tabel 4.1</b>	<i>Index Performance</i> matriks pembobot Q dan R pada <i>gain</i> filter kalman	46
<b>Tabel 4.2</b>	<i>Index Performance</i> matriks pembobot Q dan R pada <i>gain regulator</i>	48





## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Atlantis PQ Platform	6
<b>Gambar 2.2</b>	Enam Derajat Kebebasan	7
<b>Gambar 2.3</b>	Sudut $\beta$	17
<b>Gambar 2.4</b>	Blok Diagram Kontrol Optimal	19
<b>Gambar 2.5</b>	Kendali umum LQG	21
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian tugas akhir	25
<b>Gambar 3.2</b>	<i>Flowchart</i> Perancangan Sistem Kontrol LQG	34
<b>Gambar 3.3</b>	<i>Block Diagram</i> Perancangan Sistem Kontrol LQG	35
<b>Gambar 3.4</b>	<i>Block Diagram</i> Perancangan Sistem Kontrol LQG pada platform	36
<b>Gambar 3.5</b>	<i>Block Diagram</i> Perancangan Kontrol Stabilisasi	38
<b>Gambar 3.6</b>	Model simulasi <i>Open Loop Platform</i>	39
<b>Gambar 3.7</b>	Model simulasi <i>Closed Loop</i> tanpa Gangguan	40
<b>Gambar 3.8</b>	Model simulasi <i>Closed Loop</i> dengan Gangguan	40
<b>Gambar 4.1</b>	Respon <i>Open Loop</i> arah <i>sway</i> dari Platform PQ	43
<b>Gambar 4.2</b>	Respon <i>Open Loop</i> arah <i>yaw</i> dari Platform PQ	44
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik respon arah <i>sway</i> tanpa gangguan	51
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik respon arah sudut <i>yaw</i> tanpa gangguan	52
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik respon arah <i>sway</i> dengan gangguan	52
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik respon sudut <i>yaw</i> dengan gangguan	53
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik respon arah <i>sway</i> dengan gangguan gelombang sudut 30	54

<b>Gambar 4.8</b>	Grafik respon arah <i>yaw</i> dengan gangguan gelombang sudut 30	54
<b>Gambar 4.9</b>	Grafik respon sistem arah <i>sway</i> saat uji dengan gangguan Gaussian	55
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik respon sistem arah sudut <i>yaw</i> saat uji dengan gangguan Gaussian	55



## DAFTAR NOTASI

$\eta$	=	vektor orientasi arah
$x$	=	posisi <i>surge</i> (m)
$y$	=	posisi <i>sway</i> (m)
$z$	=	posisi <i>heave</i> (m)
$\phi$	=	sudut <i>roll</i> (rad)
$\theta$	=	sudut <i>pitch</i> (rad)
$\psi$	=	sudut <i>yaw</i> (rad)
$\psi_L$	=	sudut <i>yaw</i> frekuensi rendah (rad)
$\psi_H$	=	sudut <i>yaw</i> frekuensi tinggi (rad)
$u$	=	kecepatan <i>surge</i> (m/s)
$v$	=	kecepatan <i>sway</i> (m/s)
$w$	=	kecepatan <i>heave</i> (m/s)
$p$	=	kecepatan <i>roll</i> (rad/s)
$q$	=	kecepatan <i>pitch</i> (rad/s)
$r$	=	kecepatan <i>yaw</i> (rad/s)
$\dot{u}$	=	percepatan <i>surge</i> (m/s <sup>2</sup> )
$\dot{v}$	=	percepatan <i>sway</i> (m/s <sup>2</sup> )
$\dot{r}$	=	percepatan <i>yaw</i> (rad/s <sup>2</sup> )
$J(\eta)$	=	matriks transformasi
$X$	=	gaya <i>surge</i> (N)
$Y$	=	gaya <i>sway</i> (N)
$Z$	=	gaya <i>heave</i> (N)
$N$	=	momen <i>yaw</i> (Nm)
$M_{RB}$	=	matriks massa dan inersia <i>platform</i>
$X_{\dots}$	=	turunan gaya <i>surge</i> terhadap ...
$Y_{\dots}$	=	turunan gaya <i>sway</i> terhadap ...
$N_{\dots}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap ...
$M$	=	matriks inersia
$D$	=	matriks redaman
$m$	=	massa <i>platform</i>
$X_{\dot{u}}$	=	turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap $\dot{u}$ (Ndet <sup>2</sup> /m)
$Y_{\dot{v}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $\dot{v}$ (Ndet <sup>2</sup> /m)
$N_{\dot{r}}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $\dot{r}$ (Ndet <sup>2</sup> )

$X_u$	=	turunan gaya arah <i>surge</i> terhadap $u$ (Ndet/m)
$Y_v$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap $v$ (Ndet/m)
$Y_r$	=	turunan momen <i>sway</i> terhadap $r$ (N/det)
$N_v$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $v$ (N/det)
$N_{\dot{v}}$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $\dot{v}$ (Ndet <sup>2</sup> )
$N_r$	=	turunan momen <i>yaw</i> terhadap $r$ (Ndet <sup>2</sup> )
$I_z$	=	momen inersia terhadap sumbu $z$ (Nm)
$X''$	=	Gaya <i>surge</i> non dimensi
$Y''$	=	gaya <i>sway</i> non dimensi
$N''$	=	momen <i>yaw</i> non dimensi
$u_c$	=	Kecepatan arah <i>surge</i> (m/detik)
$\beta_c$	=	Arah arus laut (rad)
$v_c$	=	Kecepatan arus arah <i>sway</i> (m/detik)
$r_c$	=	Kecepatan arus arah <i>yaw</i> (rad/detik)
$x_G$	=	pusat massa (m)
$\rho$	=	rapat massa air laut (1024 kg/m <sup>3</sup> )
$g$	=	percepatan gravitasi bumi (9.8 m/det <sup>2</sup> )
$L$	=	panjang <i>platform</i> (m)
$U$	=	kecepatan servis <i>platform</i> (m/det)
$B$	=	lebar <i>platform</i> (m)
$T$	=	kedalaman <i>platform</i> (m)
$\nabla$	=	<i>displacement</i> (m <sup>3</sup> )
$C_B$	=	koefisien blok
$V_L$	=	vektor kecepatan <i>platform</i> frekuensi rendah
(m/det)		
$V_c$	=	vektor kecepatan arus (m/det)
$y$	=	posisi <i>sway</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (m)
$\dot{\xi}_\phi$	=	posisi <i>roll</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (m)
$\dot{\xi}_\psi$	=	posisi <i>yaw</i> pada gelombang frekuensi tinggi (rad)
$\dot{y}_H$	=	laju <i>sway</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (m/detik)
$\dot{\phi}_H$	=	laju <i>roll</i> akibat gelombang frekuensi tinggi
(m/detik)		

$\dot{\psi}_H$	=	laju <i>yaw</i> akibat gelombang frekuensi tinggi (rad/detik)
$x$	=	variabel state
$\dot{x}_L$	=	variabel state frekuensi rendah
$A_L$	=	matriks sistem frekuensi rendah
$x_L$	=	variabel state frekuensi rendah
$\tau_L$	=	kontrol input frekuensi rendah
$E_L$	=	matriks gangguan frekuensi rendah
$w_L$	=	vektor gangguan frekuensi rendah dengan <i>zero mean Gaussian white noise process</i>
$\dot{x}_H$	=	variabel laju state frekuensi tinggi
$A_H$	=	matriks sistem frekuensi tinggi
$B_H$	=	matriks input frekuensi rendah
$w_H$	=	vektor gangguan frekuensi tinggi dengan <i>zero mean Gaussian white noise process</i>
$\mu_o$	=	parameter kelajuan arus pada persamaan Gauss Markov orde 1
$w_L$	=	vektor gangguan dengan distribusi Gaussian
$w_u$	=	gangguan arah <i>surge</i> berdistribusi Gaussian
$w_v$	=	gangguan arah <i>sway</i> berdistribusi Gaussian
$w_r$	=	gangguan arah <i>yaw</i> berdistribusi Gaussian
$X_{wind}$	=	gaya akyat angin arah <i>surge</i> (N)
$Y_{wind}$	=	gaya akibat angin arah <i>sway</i> (N)
$N_{wind}$	=	momen akibat angin arah <i>yaw</i> (Nm)
$C_X$	=	koefisien gaya angin arah <i>surge</i>
$C_Y$	=	koefisien gaya angin arah <i>sway</i>
$C_N$	=	koefisien momen angin arah <i>yaw</i>
$A_L$	=	proyeksi lateral dari luasan lambung (m <sup>2</sup> )
$A_T$	=	proyeksi transversal (m <sup>2</sup> )
$S$	=	panjang perimeter proyeksi lateral (m)
$C$	=	jarak dari <i>bow</i> ke <i>centroid</i> (m)
$S(\omega)$	=	fungsi kecepatan spectral (m <sup>2</sup> /det)
$H_s$	=	tinggi gelombang signifikan (m)
$P_{yy}(\omega)$	=	spectrum kerapatan daya (m <sup>2</sup> /det)
$\sigma_\omega$	=	intensitas gelombang
$\varepsilon$	=	koefisien redaman



$\omega_0$	=	frekuensi modal gelombang (rad/det)
$H(s)$	=	fungsi transfer gelombang
$y$	=	matriks keluaran
$I$	=	matriks identitas
$\Psi_d$	=	<i>heading</i> yang diharapkan (derajat)
$\delta_d$	=	demand rudder yang diharapkan (derajat)
$u$	=	vektor input
$z$	=	variabel pengukuran
$P$	=	matriks kovarian error
$K_f$	=	gain filter Kalman
$R$	=	matriks kovarian output
$Q$	=	matriks kovarian input
$J$	=	fungsi kriteria pada perancangan kontrol optimal
$Q_f$	=	matriks kecepatan spectral dari <i>input noise process</i>
$R_f$	=	matriks kerapatan spectral dari <i>output noise process</i>
$Q_c$	=	matriks pembobot pada fungsi kriteria dalam perancangan kontrol LQR
$R_c$	=	matriks pembobot pada fungsi kriteria dalam perancangan LQR
$K_o$	=	<i>gain state feedback</i>
$\xi$	=	rasio redaman sistem
$\omega_n$	=	frekuensi alami sistem
$C$	=	keluaran sistem
$R$	=	masukan sistem
$P_c$	=	matriks <i>controllability</i>
$P_o$	=	matriks <i>observability</i>
$H = C$	=	matriks output sistem
$K$	=	gain <i>state feedback</i>
$G$	=	matriks gangguan pada perancangan <i>observer</i>
$r(t)$	=	input referensi atau input <i>command</i> pada perancangan <i>observer</i>
$L$	=	matriks injeksi pada perancangan <i>observer</i>
$A_o = A - LC$	=	matriks <i>observer</i> sistem
$u$	=	sinyal kontrol (keluaran controller)

$y$	=	keluaran dari sistem yang dikontrol
$\hat{x}_L$	=	estimasi variable laju state pada frekuensi rendah
$\hat{x}_L$	=	estimasi variable state frekuensi rendah
$\hat{\psi}_L$	=	estimasi variable <i>yaw</i> frekuensi rendah
$\hat{\psi}_H$	=	estimasi variable <i>yaw</i> frekuensi tinggi
$\hat{x}(t)$	=	estimasi variable state
$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t)$	=	estimasi variable output sistem
$\tilde{x}(t)$	=	error laju state
$\tilde{x}$	=	error state
$\tilde{y}$	=	error estimasi variable state
$v$	=	variable gangguan pengukuran terdistribusi Gaussian
$\bar{X}_k$	=	matriks kovarian error state





## DAFTAR PUSTAKA

Aisjah S. A., Masroeri A. A., Djatmiko E. B., Aryawan W. D. Analisis Performansi Sistem Kontrol Pada Manuvering Kapal. 2007. Jurnal Teknik Fisika Vol. 2 No. 1 ISSN 1907-266X

Aisjah, A.S. 2009. *“The Expert Control Design of Tanker Ship Maneuvering by Optimal Control as a Reference Model”*, The Journal for Technology and Science Vol. 20 No.1, IPTEK, 2009. Surabaya

Anam, A.K. 2007. *“Optimal LQG Desain for Ship Stabilization by Fin Stabilizers”*. ITS Surabaya

Aranda, Joaquín, Díaz, JM. 2004. *“An Overview about Dynamic Positioning of Ships”*. Spain : Producción Gráfica Multimedia.

Badri, Unis., Gunawan, Agus Indra., dkk. 2011. Kontrol Optimal pada Motor DC menggunakan Metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Surabaya.

Benetazzo, F, Ippoliti, G, Longhi, S Raspa P. 2012. *“Discrete Time Variable Structure Control for the Dynamic Positioning of an Offshore Supply Vessel”*. Norwegian : Proceedings of the IFAC Workshop on Automatic.

BP. (2012). Atlantis Field Fact Sheet

Cogley, T, Paquette, J, Rehouma, H. 2010. *“Dynamic Positioning Systems”*. USCG Academy Department of Engineering.

Djarmiko, Eko B. 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak**. Surabaya : ITS Press.

Fossen, T.I. 1994. **Guidance and Control of Ocean Vehicles**. USA: John Willey & Sons, Inc

Fossen, T.I. 2002. **Marine Control Systems**. Throndehim, Norway : Marine Cybernetics

Fossen, T.I. 2011. **Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control**. USA: John Willey & Sons, Inc

Hirdaris, S.E, Papanikolaou, A. 2014. “*Loads For Use In The Design Of Ships And Offshore Structures*”. **ELSEVIER Ocean Engineering**, Vol 78, 131-174

Lewis, F.L. 1992. **Applied Optimal Control & Estimation**. USA: Prentice-Hall International, Inc

Mahdarezza, A., 2010. *Analisis Perilaku Floating LNG pada Variasi Metocean terhadap External Turret Mooring System Berbasis Simulasi Time Domain*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS Surabaya, Indonesia.

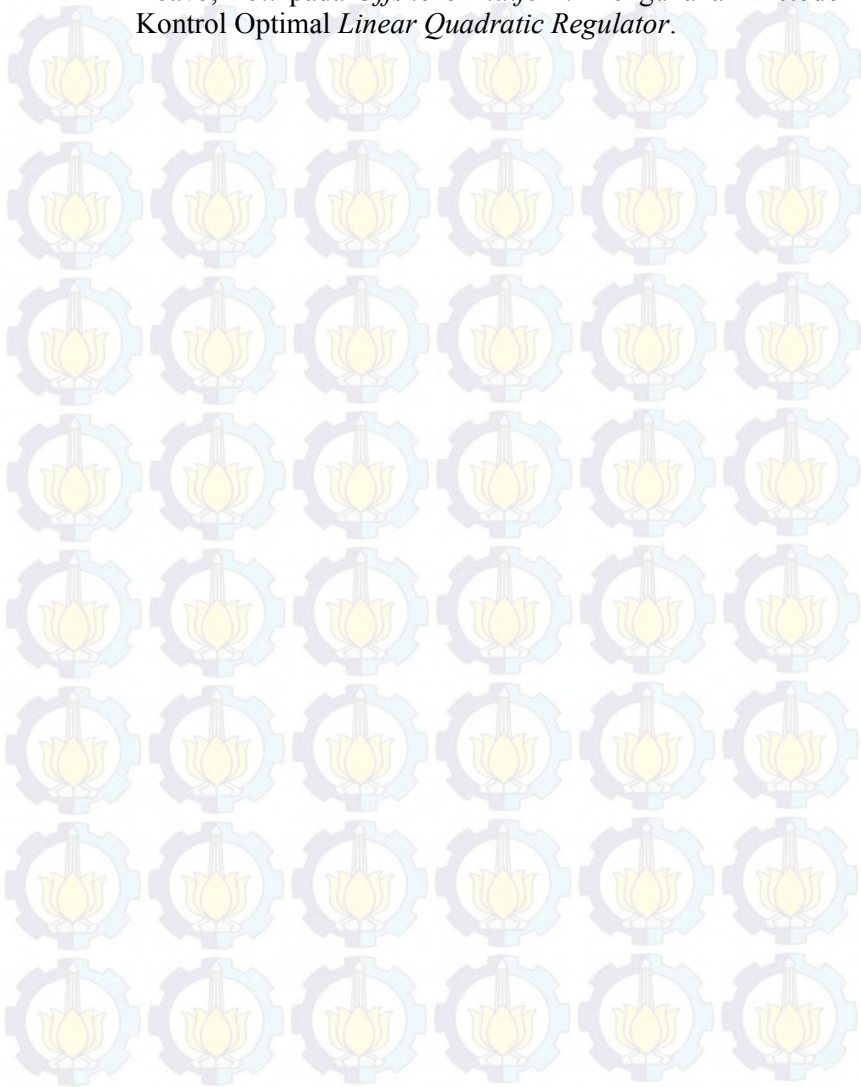
Ogata, K. (2002). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.

Prisetyono, Galih. 2009. “*Desain and Simulation LQR Control System for Control Bus Suspension of Half Car Model with Passenger*”. Surabaya.

Sørensen, Asgeir J. 2011. *A Survey Of Dynamic Positioning Control Systems*. **ELSEVIER Annual Reviews in Control** 123-136.

Yamamoto, M, Morooka, C.K. 2005. “*Dynamic Positioning System of Semi-Submersible Platform Using Fuzzy Control*”. Brazil : Department of Petroleum Engineering State University of Campinas

Zulizar Baihaqi, Muhammad. 2014. Analisis Gerakan *Sway, Heave, Roll* pada *Offshore Platform* Menggunakan Metode Kontrol Optimal *Linear Quadratic Regulator*.



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di kota Jombang 30 Maret 1993. Penulis menempuh pendidikan di MI Al-Ihsan lulus tahun 2005, MTs Al-Ihsan lulus tahun 2008, dan SMA Darul Ulum 2 Unggulan BBPT RSBI Jombang lulus 2011. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur Kemitraan Kementrian Agama 2011. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Pengukuran Fisis selama periode 2013-2014 & 2014-2015. Pengalaman Kerja Praktek selama 1 bulan di PT Petrokimia Gresik. Bidang minat penulis adalah Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, Rekayasa Energi dan Pengkodisian Lingkungan. Penulis dapat dihubungi di email [rizaaris11@gmail.com](mailto:rizaaris11@gmail.com).

“Jika Bukan Karena Engkau Wahai Kekasihku Muhammad maka Aku tidak Akan Menciptakan Dunia Ini”.



## **BAB I PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Pada masa sekarang, eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas masih dilakukan secara besar-besaran, hal ini dikarenakan belum banyaknya energi terbarukan yang bisa menggantikan minyak dan gas, sehingga segala aktivitas untuk memenuhi kebutuhan energi, diantaranya adalah dengan melakukan penambangan. Penambangan yang dilakukan berdasarkan tempat, yaitu jika penambangan dilakukan di darat biasa disebut Onshore dan jika dilakukan di lepas pantai biasa disebut Offshore. Offshore juga dibagi lagi berdasarkan kedalaman laut dan struktur bangunannya. Offshore mempunyai dua struktur utama yaitu struktur terapung dan terpancang.

Kandungan minyak bumi dan gas masih relatif terbatas untuk lokasi di laut, sehingga struktur platform untuk yang terpancang masih dinilai kurang ekonomis dari pada struktur terapung, karena keterbatasan eksplorasi dan eksploitasi yang dilakukan oleh struktur terpancang, sehingga struktur terapung bisa menjadi solusi karena dapat dengan mudah dipindahkan dari satu lokasi ke lokasi yang lain pada daerah perairan dalam. (Anam, 2007)

Bangunan offshore yang terapung, akan memungkinkan terjadi gerakan pada struktur offshore akibat gangguan dari gelombang laut. Sehingga akan ada beberapa akibat dari gangguan gelombang laut tersebut, beberapa diantaranya adalah mengganggu proses transportasi fluida dari *FSO tank rig offshore* ke kapal pengangkut dan mengganggu keamanan *Drilling Riser*.

Melihat dari gangguan-gangguan tersebut, dalam struktur offshore selalu didukung dengan adanya sistem kontrol yang dapat menstabilkan *rig offshore* sehingga dengan adanya gangguan yang tidak terprediksi namun rig tetap stabil. Setiap benda yang mengapung di Laut mempunyai 6 derajat kebebasan 3 translasi yaitu *surge* (translasi arah sumbu x), *sway* (translasi

arah sumbu y), *heave* (translasi arah sumbu z) dan 3 rotasi *roll* (berputar arah sumbu x), *pitch* (berputar arah y), *yaw* (berputar arah z), dari 6 derajat kebebasan tersebut yang akan di kontrol adalah *sway*, *roll*, dan *yaw* karena untuk arah yang lain terdapat sistem *mooring* dan *anchor* (Fossen, 2002). Namun dalam kasus seperti ini, sistem kontrol konvensional tidak dapat digunakan karena kontrol konvensional kurang handal digunakan dalam kontrol domain frekuensi. Sehingga dalam pengendalian sistem seperti ini diperlukan sistem kendali optimal.

Penelitian sebelumnya telah dilakukan dengan menggunakan optimal control system yaitu dengan Linier Quadratic Regulator yang hasilnya mampu mengontrol platform offshore terapung namun sistem kontrol ini masih lemah pada gangguan frekuensi karena tidak adanya estimator. (Baihaqi, 2014)

Sehingga dalam penelitian ini akan dilakukan sistem kontrol optimal yang dapat kokoh pada gangguan frekuensi dalam hal ini menggunakan metode kontrol *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) yang merupakan *Robust Control System* yang berkerja dalam domain frekuensi sehingga nantinya dapat terdeteksi secara jelas kriteria *sea state* setiap waktunya dan seberapa besar parameter yang dikeluarkan dalam batasan gangguannya.

## 1.2 Rumusan masalah

Dari paparan latar belakang diatas, maka permasalahan dari pelaksanaan program ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana merancang sistem kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian* pada *Semisubmersible Offshore Rig*?
2. Bagaimana analisis respon sistem kendali terhadap variabel gerakan 3 DOF (*sway*, *yaw*, dan *roll*) pada *Semisubmersible Offshore Rig* dengan menggunakan metode kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian*?



### 1.3 Batasan masalah

Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir ini diperlukan beberapa batasan masalah diantaranya sebagai berikut:

1. Penerapan sistem kontrol pada tipe Semisubmersible Offshore Rig
2. Maksimum pada kriteria sea state 6 very rough (4,0-6,0 meters wave height).
3. Pemodelan sistem dinamika dengan pendekatan lambung tunggal.
4. Sistem kontrol LQG digunakan untuk pengendalian stabilitas rig terhadap gelombang air laut
5. Variabel kendali pada gerakan 3 *Degree Of Freedom* (sway, yaw, pitch dan roll), dan untuk 3 *Degree Of Freedom* (surge, heave dan pitch) diabaikan.
6. Simulasi menggunakan software MatLab R2009a

### 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan rumusan masalah di atas tujuan dari pelaksanaan program ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat merancang sistem kendali optimal Linear Quadratic Regulator pada *Semi-submersible Offshore Rig*.
2. Dapat menganalisis respon sistem kendali terhadap variabel gerakan 3 DOF (sway, yaw dan roll) pada *Semi-submersible Offshore Rig* dengan menggunakan metode kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk menentukan parameter sistem kendali stabilisasi pada *platform semi-submersible* dengan menggunakan Sistem Kendali Optimal Linear Quadratic Gaussian untuk melihat seberapa besar optimalisasi dari metode kontrol ini.

### **1.6 Sistematika Laporan**

Laporan penelitian Tugas Akhir ini disusun secara sistematis dengan perincian sebagai berikut :

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi penelitian dan sistematika laporan.

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi tentang teori dinamika platform, dinamika gangguan, dan kontrol *linear quadratic gaussian*.

#### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam bab ini akan dijelaskan langkah – langkah yang dilakukan dalam penelitian.

#### **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini berisi analisa hasil perancangan kontrol berbasis *linear quadratic gaussian* dan analisa hasil simulasi berdasarkan uji performansi untuk mengetahui tercapainya kontrol *stabilization*.

#### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Berisi tentang kesimpulan dari hasil perancangan kendali lintasan dan saran hasil simulasi

#### **DAFTAR PUSTAKA**

Daftar pustaka dari semua referensi yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir

#### **LAMPIRAN**

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Teknologi kelautan berkembang sangat pesat dalam upaya mengeksplorasi dan mengeksploitasi sumber daya alam yang ada di laut terutama minyak bumi dan gas, sehingga banyak bangunan apung di laut untuk keperluan tersebut seperti semi-submersible rig. Kondisi lingkungan laut yang begitu ekstrem membuat semi-submersible rig harus handal dan kuat untuk menghadapi semua gangguan yang ada, salah satunya adalah dengan adanya kontrol stabilisasi pada semi-submersible rig agar dapat tetap kuat pada posisi yang telah ditentukan letaknya. (Djarmiko, 2012)

#### **2.1 Model Dinamika *Semi Submersible Rig Atlantis PQ***

##### ***Platform***

Semi-Submersible Rig, jenis rig yang sering disebut “semis” ini merupakan model rig yang mengapung (Flooded atau Ballasted) yang menggunakan Hull atau semacam kaki. Rig ini dapat didirikan dengan menggunakan tali mooring dan jangkar agar posisinya tetap diatas permukaan laut. Dengan menggunakan Thruster (semacam baling-baling) yang berada disekelilingnya, dan Ballast Control System, sistem ini dijalankan dengan menggunakan komputer sehingga rig ini mampu mengatur posisinya secara dinamis dan pada level diatas air sesuai keinginan. Rig ini sering dipakai jika Jack Up Rig tidak mampu menjangkau permukaan dasar laut. Karena jenis rig ini sangat stabil, maka rig ini sering dipakai pada lokasi yang berombak besar dan memiliki cuaca buruk, dan pada kedalaman 90 hingga 750 meter. (Hirdaris, 2014)

Atlantis merupakan *platform Semi-Submersible* terdalam di dunia. Pengembangan pengeboran dilakukan dengan menggunakan dua MODUs (*Mobil Offshore Drilling Units*). Lambung dibangun di Okpo, Korea, dan *modul topside* dibangun di Morgan City, Louisiana. (BP, 2012)

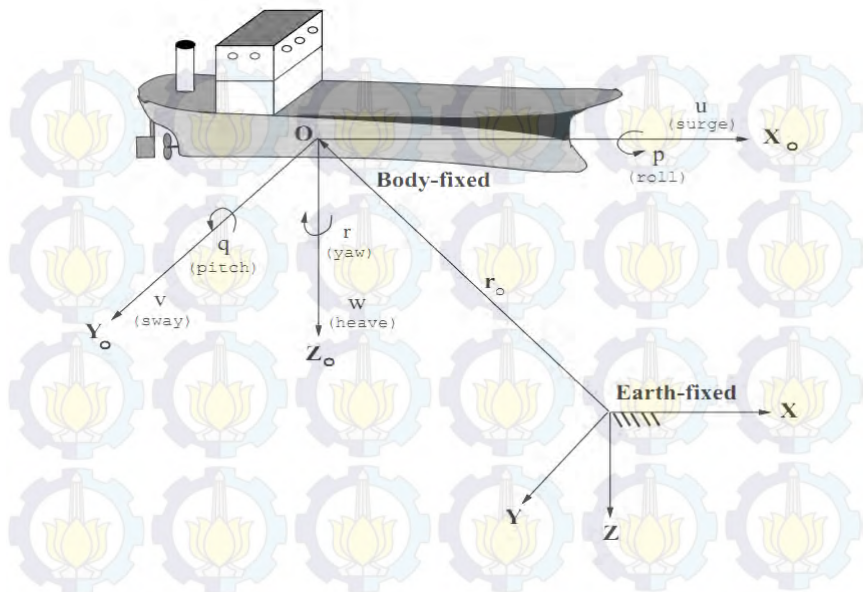




**Gambar 2.1** Atlantis PQ Platform (BP, 2012)

Pada umumnya model dinamika kapal dinyatakan dalam 6 derajat kebebasan. Derajat kebebasan tersebut terbagi kedalam bentuk gerak rotasi yang meliputi *roll*, *pitch*, dan *yaw* serta gerak translasi meliputi *surge*, *sway*, dan *heave*. Gerakan *roll* adalah gerakan berputar pada sumbu depan-belakang, gerakan *pitch* adalah gerakan berputar pada sumbu samping kiri-kanan, dan gerakan *yaw* adalah gerakan berputar pada sumbu atas-bawah. Sedangkan gerakan *surge* adalah gerakan maju, gerakan *sway* adalah gerakan ke samping, gerakan *heave* adalah gerakan ke atas. (Fossen, 1994).





**Gambar 2.2** Enam Derajat Kebebasan (Fossen, Nonlinear Modelling of Marine Vehicle in Six Degrees of Freedom, 1995)  
**Tabel 2.1** Enam Derajat Kebebasan Kendaraan Laut (Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1994)

DOF	Gerakan	Gaya dan momen	linear dan kecepatan angular	Posisi dan sudut Euler
1	Gerak pada arah-x ( <i>surge</i> )	X	u	x
2	Gerak pada arah-y ( <i>sway</i> )	Y	v	y
3	Gerak pada arah-z ( <i>heave</i> )	Z	w	z
4	Rotasi pada sumbu-x ( <i>roll</i> )	K	p	$\Phi$

5	Rotasi pada sumbu-y ( <i>pitch</i> )	M	q	$\theta$
6	Rotasi pada sumbu-z ( <i>yaw</i> )	N	r	$\Psi$

Bentuk umum untuk pergerakan kendaraan laut dapat dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_L \quad 2.1$$

Dimana  $\mathbf{v} = [v, p, r]^T$  merupakan vektor kecepatan, dan  $\boldsymbol{\tau}_L$  merupakan vektor kendali gaya dan momen.  $\mathbf{M}$  dan  $\mathbf{D}$  merupakan matrik inersia dan redaman yang diperoleh dari linierisasi persamaan gaya dan momen pada arah *sway*, *roll*, dan *yaw*. (Aisjah, 2009)

$$\text{Surge} : X = m[\ddot{u} - vr + wq - X_G(q^2 + r^2) + Y_G(pq - \dot{r}) + Z_G(pr + \dot{q})]$$

$$\text{Sway} : Y = m[\ddot{v} - wp + ur - Y_G(r^2 + p^2) + Z_G(qr - \dot{p}) + X_G(qp + \dot{r})]$$

$$\text{Heave} : Z = m[\ddot{w} - uq + vp - Z_G(p^2 + q^2) + X_G(rp - \dot{q}) + Y_G(rq + \dot{p})]$$

$$\text{Roll} : K = I_x \ddot{p} + (I_z - I_y)qr + m[Y_G(\dot{w} - uq + vp) - Z_G(\dot{v} - wp + ur)]$$

$$\text{Pitch} : M = I_y \ddot{q} + (I_x - I_z)rp + m[Z_G(\ddot{u} - vr + wq) - X_G(\dot{w} - uq + vp)]$$

$$\text{Yaw} : N = I_z \ddot{r} + (I_y - I_x)pq + m[X_G(\dot{v} - wp + ur) - Y_G(\ddot{u} - vr + wq)] \quad 2.2$$

Persamaan umum gerak benda apung diatas kemudian ditinjau dari 3 DOF (*sway*, *roll*, dan *yaw*) yang dijadikan sebagai pokok tinjauan dari penelitian tugas akhir ini sehingga menjadi persamaan umum gerak pada persamaan umum bentuk pergerakan benda di Laut yang didasarkan pada asumsi gerakan 6 DOF yang menjadi penyebab terjadinya gerak pada *rig*, yakni :

- Distribusi massa homogen dan bidang xz simetris* ( $I_{xy} = I_{yz} = 0$ )
- Mode *surge* dan *heave* dapat diabaikan ( $u = w = q = \dot{u} = \dot{w} = \dot{q} = 0$ )

Kemudian digunakan asumsi diatas ke dalam persamaan :

$$\begin{aligned} \text{Sway} &: m[\dot{v} - Y_G(r^2 + p^2) + Z_G(-\dot{p}) + X_G(\dot{r})] = Y \\ \text{Roll} &: I_x \dot{p} + m[Y_G(vp) - Z_G(\dot{v})] = K \\ \text{Yaw} &: I_z \dot{r} + m[X_G(\dot{v}) - Y_G(-vr)] = N \end{aligned} \quad 2.3$$

Karena sistem pengendalian yang akan digunakan adalah sistem pengendalian pada sistem linier orde satu, maka jika diasumsikan bahwa orde tertinggi dari gangguan dapat diabaikan, maka persamaan non-linier gerak dapat ditulis :

$$\begin{aligned} \text{Sway} &: m[\dot{v} + Z_G(-\dot{p}) + X_G(\dot{r})] = Y \\ \text{Roll} &: I_x \dot{p} + m[Y_G(vp) - Z_G(\dot{v})] = K \\ \text{Yaw} &: I_z \dot{r} + m[X_G(\dot{v}) - Y_G(-vr)] = N \end{aligned} \quad 2.4$$

Kemudian pemodelan dilakukan dengan menggunakan pemodelan *Van Amerongen* dan *Van Capelle*

Sehingga didapatkan  $\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_L$ , dengan

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mZ_G - Y_{\dot{p}} & mX_G - Y_{\dot{r}} \\ -mZ_G - K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & 0 \\ mX_G - N_{\dot{v}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

$$\text{dan } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_0 - Y_r \\ -K_v & -K_p & -mZ_G u_0 - K_r \\ -N_v & -N_p & \mathbf{mX}_G \mathbf{u}_0 - N_r \end{bmatrix} \text{ dan } \boldsymbol{\tau}_L = T\mathbf{K}\mathbf{u} \text{ dengan}$$

$$\boldsymbol{\tau}_L = [\mathbf{Y} \mathbf{K} \mathbf{N}]^T$$

Sehingga Persamaannya menjadi sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mZ_G - Y_{\dot{p}} & mX_G - Y_{\dot{r}} \\ -mZ_G - K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & 0 \\ mX_G - N_{\dot{v}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_0 - Y_r \\ -K_v & -K_p & -mZ_G u_0 - K_r \\ -N_v & -N_p & mX_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} Y_{\tau} \\ K_{\tau} \\ N_{\tau} \end{bmatrix} \tau_R
 \end{aligned}$$

Kemudian dengan invers matriks didapatkan sebuah persamaan *state space* dari *platform semi-submersible* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 M^{-1}D &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ dan } -M^{-1}B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \tau_R
 \end{aligned}$$

Pada matrik inersia (M) dan matrik redaman (D) di atas mengandung parameter hidrodinamikanya, dimana  $m$  = massa,  $Y_{\dot{v}}$  = turunan gaya arah *sway* terhadap  $\dot{v}$ ,  $Y_{\dot{p}}$  = turunan gaya arah *yaw* terhadap  $\dot{p}$ ,  $K_{\dot{p}}$  = turunan momen *roll* terhadap  $\dot{p}$ ,  $Y_v$  = turunan gaya arah *sway* terhadap  $v$ ,  $Y_p$  = turunan gaya arah *yaw* terhadap  $p$ ,  $K_v$  = turunan momen *roll* terhadap  $v$ ,  $K_{\dot{v}}$  = turunan momen *roll* terhadap  $\dot{v}$ ,  $K_p$  = turunan momen *roll* terhadap  $p$ ,  $N_{\dot{v}}$  = turunan momen *yaw* terhadap  $\dot{v}$ ,  $N_{\dot{r}}$  = turunan momen *yaw* terhadap  $\dot{r}$ ,  $I_{x,z}$  = moment inersia arah X dan Z,  $X_G$  = pusat massa sumbu X,  $Z_G$  = pusat massa sumbu Z.



Pada pendekatan teori *slender body strip* turunan koefisien hidrodinamika dapat dinyatakan sebagai fungsi dari rasio panjang terhadap lebar dari *platform*, dengan dikalikan sebuah konstanta tertentu. Smitt (1970), Norrbin (1971), dan Inoue (1981) mengembangkan suatu rumusan secara empiris dari beberapa persamaan turunan koefisien hidrodinamika yang dikemukakan oleh Clarke (1982). Bentuk persamaan regresi tersebut dinyatakan dalam bentuk persamaan (2.5a – 2.5h). Koefisien hidrodinamika pada persamaan (2.5a – 2.5h) dengan tanda ' merupakan bentuk non-dimensional yang diturunkan dengan sistem Prime I. Untuk memperoleh besaran gaya dikalikan dengan  $\frac{1}{2}\rho U^2 L^2$  dan momen dikalikan dengan  $\frac{1}{2}\rho U^2 L^3$ . Dimana  $\rho$  = rapat massa air laut ( $1014 \text{ kg/m}^3$ ),  $L_{pp}$  = panjang *platform*,  $U$  = kecepatan servis *platform*,  $B$  = lebar *platform*,  $T$  = Kedalaman *platform*,  $C_B$  = koefisien blok. Persamaan turunan gaya dan momen dalam nondimensional dapat dituliskan pada persamaan (2.5a-2.5h) dibawah ini (Engineers, 1989) :

$$\frac{-Y_p''}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (2.5a)$$

$$\frac{-Y_v''}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_B B}{T} \quad (2.5b)$$

$$\frac{-Y_r''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-Y_p''}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.08 \frac{B}{T} \quad (2.5c)$$

$$\frac{-Y_f''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-Y_p''}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \frac{B}{L} - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (2.5d)$$

$$\frac{-N_r''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_p''}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L} \quad (2.5e)$$

$$\frac{-N_f''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_p''}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \frac{B}{L} \quad (2.5f)$$

$$\frac{-N_v''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_v''}{\pi(T/L)^2} = 0.5 \frac{B}{L} + 2.4 \left(\frac{B}{T}\right)^2 \quad (2.5g)$$

$$\frac{-N_b''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_b''}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \frac{B}{L} - 0.041 \frac{B}{T} \quad (2.5h)$$

Untuk memperoleh besaran gaya dikalikan dengan  $\mu\rho g\nabla$  dan momen dikalikan dengan  $\mu\rho g\nabla L$  (Fossen, 1993). Dimana pada sistem ini  $\rho$  = rapat massa air laut ( $1024 \text{ kg/m}^3$ ),  $L$  = panjang kapal,  $g$  = percepatan gravitasi,  $B$  = lebar kapal,  $T$  = kedalaman kapal,  $C_B$  = koefisien blok, rasio massa dari platform dengan densitasnya  $\mu = \frac{m}{\rho\nabla}$  dan juga  $\nabla$  yang merupakan pergeseran dari lambung platform.

Bentuk normalisasi yang digunakan untuk persamaan gerak *platform* adalah *Bis System* dari SNAME (1950). (SNAME, 1950) Sistem ini menggunakan kecepatan kapal  $U$ , panjang  $L=L_{pp}$  (panjangantarabagiandepandangaristegaklurusburitan), unit waktu  $\sqrt{L/g}$  dan unit massa  $\frac{1}{2}\mu\rho\nabla$  sebagai variabel normalisasi. Variabel-variabel normalisasi dalam *Bis System* dapat dilihat pada Tabel 2.2. Kuantitas non-dimensional dalam *Bis System* dapat dinyatakan dengan tanda (") (Fossen, 1993).

**Tabel 2.2** Variabel-variabel normalisasi untuk *Bis System* (Fossen, 1994)

<i>Unit</i>	<i>Bis System</i>
<i>Length</i>	$L$
<i>Mass</i>	$\frac{1}{2}\mu\rho\nabla$
<i>Inertia Moment</i>	$\frac{1}{2}\mu\rho\nabla L^2$
<i>Time</i>	$\sqrt{L/g}$
<i>Reference Area</i>	$\mu \frac{2\nabla}{L}$

<b>Position</b>	L
<b>Angle</b>	1
<b>Linear Velocity</b>	$\sqrt{Lg}$
<b>Angular Velocity</b>	$\sqrt{\frac{g}{L}}$
<b>Linear Acceleration</b>	$g$
<b>Angular Acceleration</b>	$\frac{g}{L}$
<b>Force</b>	$\mu\rho g\nabla$
<b>Moment</b>	$\mu\rho g\nabla L$

Spesifikasi dari *Semi-Submersible Rig* untuk jenis *Atlantis PQ Platform* adalah sebagai berikut :

*Class & Type* : *Moored Semi-Submersible ABS Classed & Certified "Floating Offshore Installation"*

*Tonnage* : 30,882 metric tons

*Displacement* : 88,826 metric tons

*Length (Lpp)* : 129,07 m

*Beam (B)* : 116,1 m

*Draught (T)* : 26 m



*Depth* : 52 m

## 2.2 Model Dinamika Gangguan Platform

Gelombang merupakan pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva/grafik sinusoidal. Secara umum gangguan lingkungan yang mempengaruhi dinamika sebuah kapal ketika melakukan pelayaran meliputi arus, angin, dan gelombang. (Fossen, 1994).

Berikut ini merupakan tabel deskripsi kondisi gelombang laut berdasarkan skala presentase kemungkinan terjadinya gelombang.

**Tabel 2.3.**Deskripsi Laut (Fossen,1994)

Persentase probabilitas					
kode laut	Deskripsi laut	gelombang (m)	Dunia	Atlantik utara	Atlantik selatan
0	<i>Calm (glassy)</i>	0	-	-	-
1	<i>Calm (rippled)</i>	0-0.1	11.248	8.3103	6.0616
2	<i>Smooth (wavelets)</i>	0.1-0.5	-	-	-
3	<i>Slight</i>	0.5-1.25	31.685	28.1996	21.5683
4	<i>Moderate</i>	1.25-2.5	40.194	42.0273	40.9915
5	<i>Rough</i>	2.5-4	12.8	15.4435	21.2383
6	<i>Very rough</i>	4-6	3.025	4.2938	7.0101
7	<i>High</i>	6-9	0.926	1.4968	2.6931
8	<i>Very high</i>	9-14	0.119	0.2263	0.4346
9	<i>Phenomenal</i>	Over 14	0.0009	0.0016	0.0035

### 2.2.1 Model Gangguan Gelombang dalam Frekuensi Rendah

Adanya gelombang dengan frekuensi rendah dan tinggi pada saat kondisi air tenang dan beriak menyebabkan posisi *platform* akan dipengaruhi oleh gangguan tersebut. Sehingga pemodelan dapat dilakukan ke dalam dua range frekuensi, yaitu



frekuensi tinggi dan frekuensi rendah. Model dinamika posisi *platform* dalam frekuensi rendah dapat digambarkan dalam model linier *sway*, *heave*, dan *roll*. Pada studi simulasi dan eksperimen, menunjukkan bahwa Coriolis dan *damping* nonlinier dapat diabaikan, sehingga model dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_L + \mathbf{D}\mathbf{v}_L = \boldsymbol{\tau}_L + \mathbf{w}_L \quad 2.6$$

Dengan  $\mathbf{v}_L = [v_L, w_L, p_L]^T$  merupakan vektor kecepatan frekuensi rendah,  $\boldsymbol{\tau}_L$  vektor kontrol gaya dan momen. Dan  $\mathbf{w}_L = [w_v, w_w, w_p]^T$  vektor gangguan dengan *zero Mean Gaussian white noise process*. Matriks inersia dan redaman adalah:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mZ_G - Y_{\dot{p}} & mX_G - Y_{\dot{r}} \\ -mZ_G - K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & 0 \\ mX_G - N_{\dot{v}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_0 - Y_r \\ -K_v & -K_p & -mZ_G u_0 - K_r \\ -N_v & -N_p & mX_G u_0 - N_r \end{bmatrix}$$

Dari persamaan kinematika kapal,  $\boldsymbol{\eta}_L = \mathbf{v}_L$ . Dimana:  
 $\boldsymbol{\eta}_L = [y_L, \phi_L, \psi_L]^T$

Persamaan keadaan secara umum untuk dinamika posisi kapal:

$$\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{A}_L \mathbf{x}_L + \mathbf{B}_L \boldsymbol{\tau}_L + \mathbf{E}_L \mathbf{w}_L \quad 2.7$$

Dimana:  $\boldsymbol{\eta}_L = [y_L, \phi_L, \psi_L, v_L, p_L, r_L]^T$ , dan  $\mathbf{A}_L = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}$ ;  
 $\mathbf{B}_L = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{E}_L = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}$ .

### 2.2.2 Model Gangguan Gelombang dalam Frekuensi Tinggi

Pergerakan frekuensi tinggi dari kapal secara umum merujuk pada gangguan gelombang orde 2. Berdasarkan persamaan linier gerak frekuensi tinggi:

$$h(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad 2.8$$

dimana parameter  $K_w$  tergantung pada kondisi laut,  $\xi$  adalah rasio redaman relatif, dan  $\omega_0$  adalah parameter desain. Nilai  $\omega_0$  menunjukkan karakter gerakan kapal (Fossen, 1994). Pemodelan kapal frekuensi tinggi dalam *surge*, *sway*, dan *yaw* sebagai berikut :

$$\xi_y = y_H \quad 2.9a$$

$$\dot{x}_H = -2\zeta\omega_0 y_H - \omega_0^2 \xi_y + w_y \quad 2.9b$$

$$\xi_\phi = \phi_H \quad 2.9c$$

$$\dot{\phi}_H = -2\zeta\omega_0 \phi_H - \omega_0^2 \xi_\phi + w_\phi \quad 2.9d$$

$$\xi_\psi = \psi_H \quad 2.9e$$

$$\dot{\psi}_H = -2\zeta\omega_0 \psi_H - \omega_0^2 \xi_\psi + w_\psi \quad 2.9f$$

Dengan  $\xi$  rasio redaman relatif yang dapat diperoleh berdasarkan kondisi sesungguhnya atau secara simulasi dan bernilai  $< 1.0$ , nilai  $\omega_0$  menandakan komponen gerak frekuensi tinggi.  $w_x$ ,  $w_y$ ,  $w_\psi$  merupakan *zero mean Gaussian white noise process*. Model gelombang frekuensi tinggi dapat dinyatakan dengan:

$$\dot{x}_H = A_H x_H + E_H w_H \quad 2.9$$

dimana

$$x_H = [\xi_y, \xi_\phi, \xi_\psi, x_H, y_H, \psi_H]^T, w_H = [w_x, w_y, w_\psi]^T$$

sehingga apabila dimodelkan dalam bentuk persamaan state space maka pemodelan gangguan gelombang frekuensi tinggi adalah sebagai berikut :

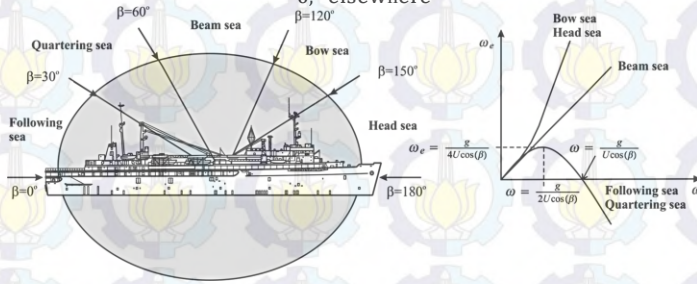
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_H \\ \dot{y}_H \\ \dot{\Psi}_H \\ \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 \\ I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ \Psi_H \\ \xi_x \\ \xi_y \\ \xi_{\Psi} \end{bmatrix} + K_w \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_{\Psi} \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad 2.10$$

### 2.2.3 Model Gangguan Gelombang dengan arah sudut 30

Situasi yang paling mungkin ditemui di laut adalah gelombang puncak dengan arah sudut tertentu. Hal ini dilihat sebagai penyimpangan puncak gelombang di sepanjang sudut kanan ke arah angin, sehingga dapat dimodelkan oleh spektrum gelombang 2-D sebagai berikut :

$$S(\omega, \beta) = S(\omega)f(\beta) \quad 2.11$$

$$\text{Dengan } f(\beta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2(\beta), & -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$



**Gambar 2.3** Sudut  $\beta$  (Fossen, 2011)

Gangguan gelombang dengan arah tertentu dapat dimodelkan dengan model orde dua sebagai berikut

$$hh(s) = \frac{K_w S}{s^2 + 2\lambda\omega_0 s + \omega_0^2} \quad 2.12$$

dan  $K_w = 2\lambda\omega_0\sigma$ , dengan  $\sigma$  adalah konstanta yang mendeskripsikan intensitas gelombang, dan  $\lambda$  adalah damping



ratio dan  $\omega_0$  adalah frekuensi dominan, dan  $s = j\omega$  adalah respon frekuensi. (Fossen, 2011)

Dan  $\sigma = \max S(\omega)$  dan untuk PM Spektrum  $\sigma = \sqrt{\frac{A}{\omega_0^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega_0^4}\right)}$

### 2.3 Aktuator Platform

Aktuator untuk menjaga stabilitas platform selain menggunakan mooring system juga dipakai suatu aktuator berupa *Thruster*. Jenis *thruster* yang biasa digunakan dalam DPS (*Dynamic Positioning System*) adalah *Dynamic Positioning (DP) Thruster*. (Benatezzo, 2012)

Untuk kondisi keadaan laut yang begitu ekstrem maka diperlukan suatu aktuator dari *Semi-Submersible Rig* yang mampu mengontrol stabilisasi dari platform adalah *Thruster* tipe *Rotatable (Azimuth) Thruster* karena *thruster* ini mampu mengatasi gerakan-gerakan platform dalam arah *sway*, *roll* dan *yaw*. Pada tugas akhir kali ini terdapat 2 *thruster* dan yang digunakan adalah *azimuth thruster* dengan spesifikasi daya sebesar 8000 *horse power* (5965.59 kW) dan diameter 16.4 feet (5 m). Untuk menghitung gaya yang digunakan untuk menjaga stabilitas dari platform menggunakan persamaan 2.11 berikut ini :

$$T_0 = K.(P.D)^{2/3} \quad 2.13$$

Dengan :

$T_0$  : Gaya dorong dari *thruster* dalam N (kgf, lbf)

$P$  : Daya dari *propeller thruster* dalam kW (PS, hp)

$D$  : Diameter *propeller thruster* dalam m (m, ft)

$K$  : Konstanta *thruster* 1250 (103.8, 103.7)

### 2.4 Kriteria Keterkendalian dan Keteramatan

Kriteria robust pada suatu kontrol sistem bergantung pada sebuah sitem kendali dapat dipenuhi apabila sistem yang dikendalikan mempunyai sifat *reachable* atau *controllable* (dapat dikendalikan) dan bersifat *observable*. Sistem tersebut dapat dikatakan seperti itu jika  $x \in R^n$  dan  $u \in R^n$ , dikatakan *reachablecontrollable*.



Jika semua vector  $x$  adalah reachable, maka jika satu mampu menacari sebuah input kendali untuk menggerakkan sistem tersebut dari nol sampai pada kondisi state tertentu, sistem tersebut memiliki matriks *controllability*. Matriks tersebut didefinisikan sebagai berikut,

$$P_C = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{k-1}B] \quad 2.12$$

Dan  $\text{rank}(P_C) = n \text{ atau } \neq 0$

Persamaan ruang keadaan sistem dikatakan *observable* (teramati) sempurna apabila matriks  $P_O$  mempunyai  $\text{rank} = n$ .

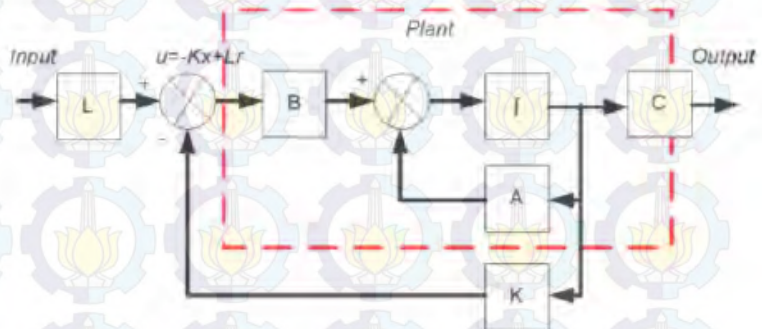
$$P_O = [CA^{k-1} \ \dots \ CA \ C]^T \quad 2.39$$

Sistem dikatakan observable jika dan hanya jika  $\text{rank}(P_O) = n \text{ atau } \neq 0$ . (Ogata, 2002)

## 2.5 Kontrol Optimal

Istilah optimal mengandung maksud hasil yang paling baik yang dapat dicapai dari suatu sistem. Dalam sistem kontrol optimal, istilah optimal seringkali merujuk pada nilai minimal, misalnya meminimalkan bahan bakar, waktu, dan kesalahan.

Adapun blok diagram sistem control optimal secara umum dapat digambarkan pada gambar dibawah ini.



**Gambar 2.4** Blok Diagram Kontrol Optimal (Ogata, 2002)

Sistem kontrol yang baik adalah sistem kontrol yang memiliki daya tanggap yang cepat dan stabil, namun tidak memerlukan energi yang berlebihan. Sistem kontrol yang

demikian dapat dicapai melalui pengaturan indeks performansi yang tepat. Sistem kontrol yang berdasarkan optimasi indeks performansi disebut sistem kontrol optimal.

Pada suatu sistem indeks performansi dipilih sesuai dengan bagian yang akan dioptimalkan. Bentuk umum dari indeks performansi adalah sebagai berikut :

$$J = \int_{t_0}^T L(x, u, t) dt \quad 2.14$$

$J$  = Indeks Performansi

$L(x, u, t)$  = Fungsi dari  $x$ ,  $u$ , dan  $t$

$T$  = Waktu

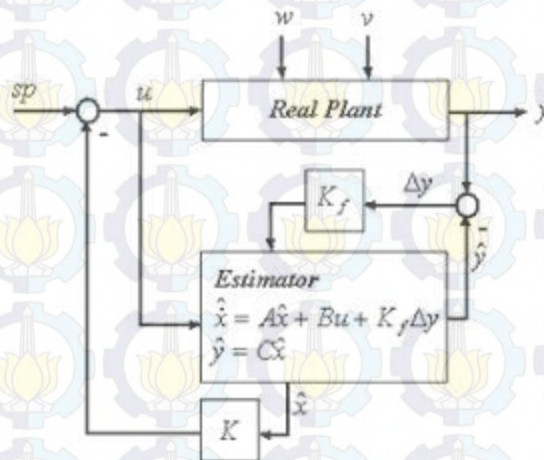
Salah satu metode yang biasa digunakan untuk meminimalkan indeks performansi yaitu persamaan Aljabar Ricatti yang digunakan untuk mengoptimalkan sistem proses yang berbentuk linear. Suatu sistem kontrol akan optimal pada indeks unjuk kerja yang diberikan, tetapi tidak optimal lagi pada indeks unjuk kerja yang lain. (Prisetyono, 2009)

## 2.6 Linear Quadratic Gaussian

Kendali optimal Linier Quadratic Gaussian (LQG) adalah teknik kendali modern yang diimplementasikan dalam bentuk ruang dan waktu (state space) yang digunakan untuk mendesain dinamik optimal regulator. Pada perjalanan perkembangan konsep, LQR (Linear Quadratic Regulator) mengalami pengembangan yaitu dengan menambahkan estimator optimal (filter Kalman) yang berfungsi menyaring noise (derau) dalam bentuk sinyal Gaussian (noise yang dibangkitkan dari alam). Konsep pengembangan itu diperkenalkan pada tahun 1970 dengan nama Linier Quadratic Gaussian (LQG). Pada konsep LQG diperkenalkan konsep teori pemisahan (separation theorem) atau sering disebut Certainty Equivalence Principle. Dari hasil tersebut penguatan umpan balik dan filter dalam LQG dirancang secara terpisah.

Pengendali LQG (bertin, 1998), telah diaplikasikan pada model kapal Gaeta Class Minehunter, dan menghasilkan kemampuan tracking yang ditunjukkan pada saat berada pada gangguan arus laut dan angin. Strategi pengendali robust yang lain yaitu  $H_{\infty}$  untuk autopilot kapal, dengan fungsi transfer

dihitung berdasarkan eksperimen saat uji belok. Simulasi pengendali dilakukan terhadap kapal ferry Mascarenas, kapal Zuidweg, kapal Chislet, dan diperoleh respon yang baik. (Ogata, 2002)



**Gambar 2.5.** Kendali umum LQG (Lewis, 1992)

Model state space :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Gw \\ y &= cx + v\end{aligned}$$

Keterangan :

- u : Input proses.
- y : Output proses.
- w : gangguan proses.
- v : gangguan pengukuran (white noise)
- A : Matrik plant.
- B : Matrik kendali input.
- C : Matrik pengukuran.
- K : Penguatan umpan balik (Kalman).
- Kf : Penguatan filter Kalman.

Untuk mencari sinyal kendali optimal u diperlukan penguat pengendali K (Regulator) dan penguat



estimator Kf (Filter Kalman) yang optimal. Untuk menjaga sistem tetap stabil, diperlukan controller dan estimator yang stabil. Menurut teorema pemisahan dijelaskan bahwa harga K dan Kf bisa diperoleh secara terpisah. Pencarian harga K dilakukan secara seolah-olah sistem bersifat deterministik yaitu dengan metode LQR, sedangkan pencarian harga Kf optimal dilakukan dengan sistem bersifat stokastik, yaitu index performansi kesalahan minimum.<sup>[2]</sup>

Besarnya harga :

$$K = -R^{-1}B^T S$$

Untuk mencari besarnya S dapat menggunakan persamaan Riccati:

$$A^T S + SA - SBR_c^{-1}B^T S + Q_c = 0$$

dengan indeks performansi minimum :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q_c x + u^T R_c u) dt$$

dengan asumsi :  $Q_c \geq 0, R_c > 0$

$Q_c$  menentukan matriks keadaan dan  $R_c$  menentukan matriks kendali. Penentuan besarnya matrik  $Q_c$  dan  $R_c$  tergantung dari si-pendesain (Lewis, F.L., 1992). Karena  $Q_c$  dan  $R_c$  adalah sebagai matriks nilai bobot pada indeks performansi.

Filter Kalman merupakan estimator optimal yang berfungsi mengestimasi variabel keadaan dan menyaring noise (derau). Prinsip kerja estimator berdasarkan sifat rekursif. Optimisasi yang dilakukan adalah dengan menekan harga error kovarian sekecil mungkin. maka, indeks performansinya atau cost function-nya dapat ditulis :

$$J = E\{\hat{x} - x\}^T [\hat{x} - x]$$

$\hat{x}$  adalah harga estimasi dari variabel  $x$  dalam fungsi waktu. Estimasi variabel keadaan optimal  $\hat{x}$  diperoleh dari sistem dinamik filter Kalman sebagai berikut<sup>[2]</sup> :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - \hat{y})$$

Penguatan Filter Kalman :

$$K_f = PC^T R_f^{-1}$$



Sedangkan Matriks P diperoleh dari persamaan Riccati :

$$0 = PA^T + AP - PC^T R_f^{-1} CP + Q$$

$$Q_f > 0, R_f > 0$$

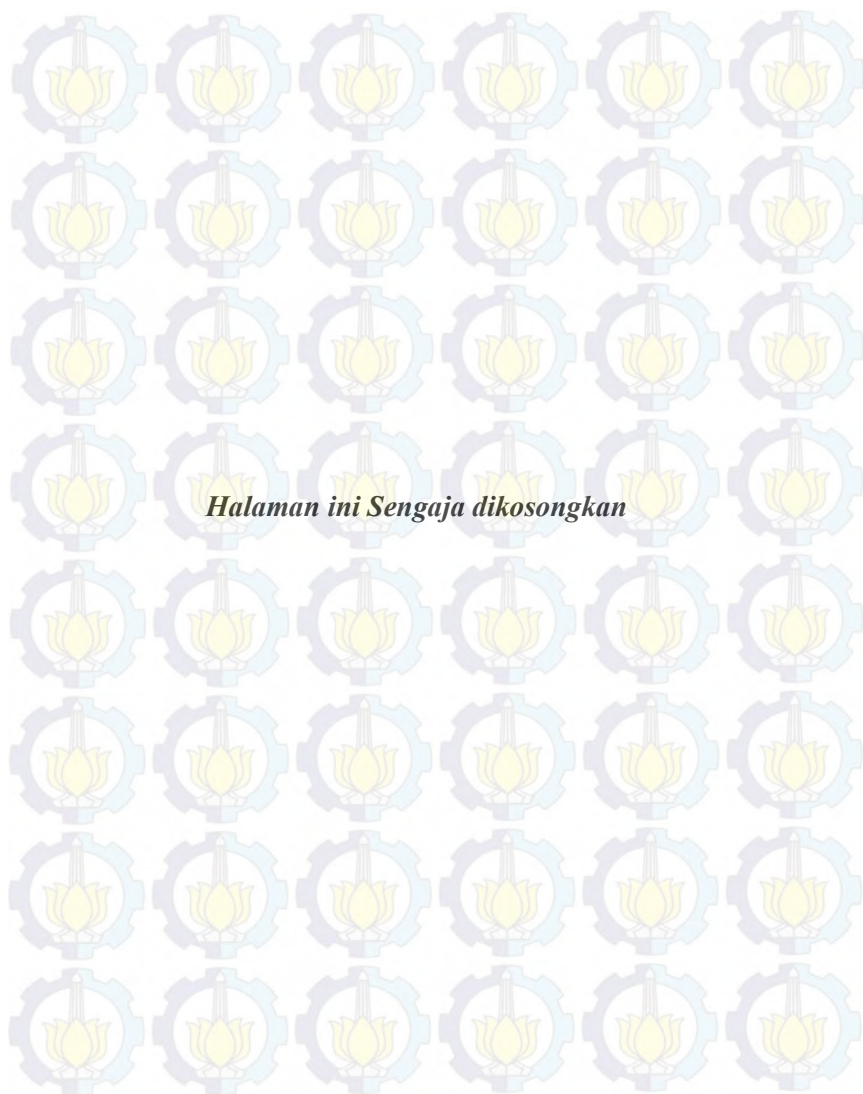
dengan asumsi-asumsi matriks A dan B terkendali, dan C teramatasi  $Q_f > 0, R_f > 0$ , maka filter Kalman dijamin stabil asimtotik. Matriks  $Q_f$  dan  $R_f$  adalah noise covariance, Matriks  $Q_f$  dan  $R_f$  adalah noise covariance. Matriks pembobot pada indeks performansi dipilih untuk menggunakan performansi desain kendali. Untuk menentukan matriks pembobot  $Q_f$  dan  $R_f$  dapat dilakukan menggunakan metode trial-error atau Brysons Rule. (Aisjah, 2007)

Metode *Bryson* digunakan untuk mepercepat untuk menemukan nilai matriks pembobot, dengan cara sebagai berikut :

$$Q = \frac{1}{\text{nilai maksimum } x_i^2} \text{ dengan } i \in \{1, 2, \dots, l\}$$

$$R = \frac{1}{\text{nilai maksimum } U_j^2} \text{ dengan } j \in \{1, 2, \dots, m\}$$

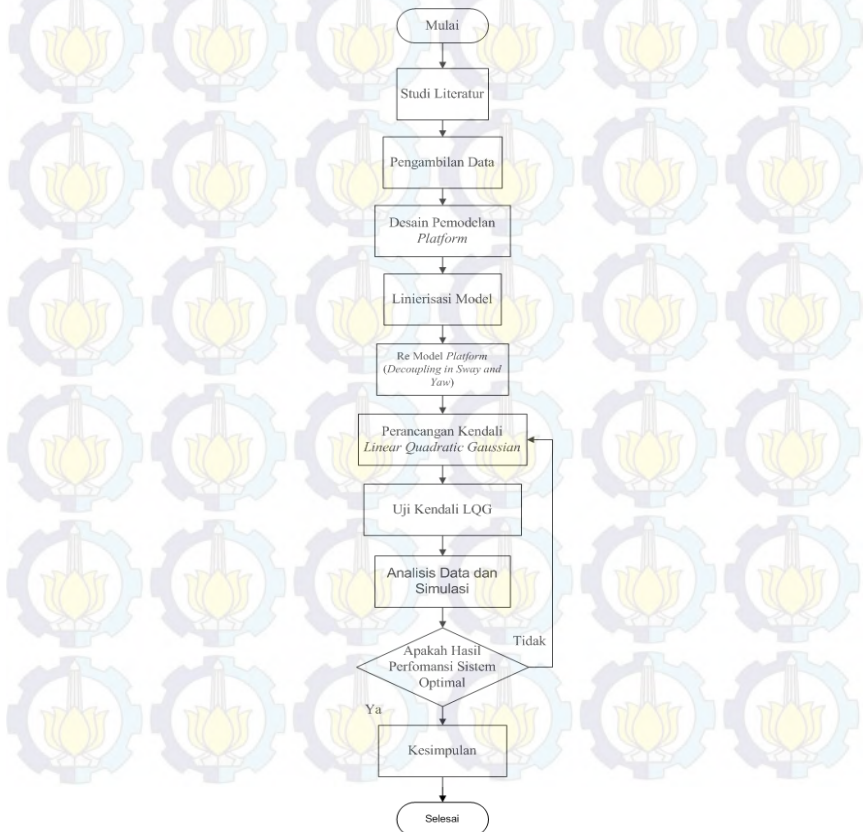
sehingga dengan cara tersebut didapat nilai yang membuat fungsi objektif minimal. (Hespanha, 2007)



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Alur Penelitian

Untuk mempermudah alur pengerjaan penelitian agar sesuai dengan tujuan yang diharapkan, pada bab ini berisi uraian tentang tahapan-tahapan pengerjaan dalam tugas akhir mulai dari studi literatur, pemodelan sistem, perancangan sistem kendali, simulasi *matlab* hingga penyusunan laporan tugas akhir. Berikut ini merupakan *flowchart* penelitian :



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian tugas akhir

### 3.2 Studi Literatur

Studi literatur yang telah dilakukan meliputi pemahaman tentang hidrodinamika platform, spesifikasi platform, gangguan-gangguan untuk platform, dan sistem kendali optimal LQG (*Linier Quadratic Gaussian*). Beberapa sumber diambil dari buku, jurnal, dan penelusuran dari penelitian-penelitian yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya.

### 3.3 Pengambilan Data

Spesifikasi dari *Semi-Submersible Rig* untuk jenis Atlantis PQ Platform adalah sebagai berikut :

*Class & Type* : *Moored Semi-Submersible ABS Classed & Certified "Floating Offshore Installation"*

*Tonnage* : 30,882 metric tons

*Displacement* : 88,826 metric tons

*Length (Lpp)* : 129,07 m

*Beam (B)* : 116,1 m

*Draught (T)* : 26 m

*Depth* : 52 m

### 3.4 Pemodelan Sistem Dinamik Platform

Pemodelan sistem dinamika platform dilakukan pada platform Atlantis PQ, untuk memodelkan sistem yang sesungguhnya ke dalam bentuk model matematis. Pemodelan matematis tersebut didapatkan dari pendekatan yang dilakukan oleh *Van Amerongen* dan *Van Capelle*. Variabel-variabel tersebut didapatkan dari persamaan regresi Clarke. Berikut ini merupakan persamaan non dimensional yang didapatkan berdasarkan hasil perhitungan yaitu :

$$Y_v'' = 0.34614$$

$$N_r'' = K_p'' = 0.02166$$

$$Y_r'' = Y_p'' = -0.14292$$

$$N_v'' = K_v'' = -0.12531$$

$$Y_v'' = 0.00315$$

$$I_x'' = 9.3276E - 06$$

$$Y_r'' = Y_p'' = -0.06841$$

$$N_v'' = K_v'' = -0.10275$$

$$N_r'' = K_p'' = 0.01014$$

$$Z_g'' = 0.07085$$

$$I_r'' = 7.6264E - 06$$



Hasil nilai koefisien hidrodinamika diatas didapatkan untuk mendapatkan variabel-variabel persamaan dari pemodelan *Van Amerongen* dan *Van Capelle*. (Fossen, 2002)

Sehingga didapatkan  $\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \tau_L$ , dengan  $\mathbf{M} =$

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -mZ_G - Y_{\dot{p}} & mX_G - Y_{\dot{r}} \\ -mZ_G - K_{\dot{v}} & I_x - K_{\dot{p}} & 0 \\ mX_G - N_{\dot{v}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

dan  $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_0 - Y_r \\ -K_v & -K_p & -mZ_G u_0 - K_r \\ -N_v & -N_p & mX_G u_0 - N_r \end{bmatrix}$  dan  $\tau_L = TKu$

dengan  $\tau_L = [Y \ K \ N]^T$

$$-M^{-1}D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ dan } -M^{-1}B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

### 3.4.1 Re model Platform Semi-Submersible

Pemodelan *Platform* dengan 3 derajat kebebasan yaitu *sway*, *yaw* dan *roll*, kemudian dilakukanlah *Decompositions in Roll and Sway-Yaw Subsystems*, karena untuk arah *roll* diberi alat control tersendiri yaitu *fin stabilizer* (Fossen, 2002). Sehingga didapatkan persamaan untuk arah *sway* dan *roll* :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{31} & a_{33} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_R$$

dengan

$$M^{-1}D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ dan } -M^{-1}B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

Dan dipatkan nilai :

$$-M^{-1}D = \begin{bmatrix} -2.584 & -0.363 & -0.363 \\ -6.475 & -2.193 & -1.724 \\ -6.545 & -1.734 & -2.202 \end{bmatrix}$$

$$-M^{-1}B = \begin{bmatrix} -0.018 \\ -0.025 \\ -0.088 \end{bmatrix}$$

sehingga persamannya menjadi :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.584 & -0.363 & 0 \\ -6.545 & -2.202 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.018 \\ -0.088 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_R \quad (3.2)$$

Pemodelan selanjutnya dilakukan terhadap gelombang pada frekuensi rendah. Pemodelan yang dilakukan berdasarkan pada persamaan 2.19, dengan variabel keadaan  $\dot{x}_L$  adalah  $\dot{x}_L = [y_L, \Phi_L, \psi_L, v_L, p_L, r_L]^T$ . Kemudian dilakukan perhitungan  $A_L$ ,  $B_L$ , dan  $E_L$  yang merupakan matrik sistem pada gangguan frekuensi rendah seperti yang terdapat pada persamaan 2.20.

$$A_L = \begin{bmatrix} -2.584 & -0.363 & 0 \\ -6.545 & -2.202 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B_L = \begin{bmatrix} -0.018 \\ -0.025 \\ -0.088 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$E_L = \begin{bmatrix} 23,2862 & -6,8899 & 0 \\ -7,0353 & -126,9255 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Persamaan (3.2) dinyatakan dalam bentuk persamaan *state-space* dengan menggunakan konsep invers matriks sehingga diperoleh model sistem persamaan *state-space* yang dinyatakan dalam konstanta matriks A, B, dan E sebagai berikut:

$$A_L = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & 0 \\ -2.584 & -0.363 & 0 \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -6.545 & -2.202 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B_L = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ -0.018 \\ -0.088 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$E_L = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \\ -3.277 & -10.351 & -10.354 \\ -15.55 & -2.925 & -49.137 \\ -15.638 & -49.404 & -3.222 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Model frekuensi tinggi dibangkitkan oleh gelombang dengan fungsi transfer orde dua menggunakan persamaan (2.9a-2.9f) dalam bentuk persamaan *state-space* sesuai dengan persamaan (2.10) sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_H \\ \dot{\phi}_H \\ \dot{\psi}_H \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_\phi \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 & 0 \\ 0 & 0 & -2\zeta\omega_0 & 0 & 0 & -\omega_0^2 \\ I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} + K_w \begin{bmatrix} w_y \\ w_z \\ w_\phi \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Dengan model gangguan gelombang untuk perairan internasional mengacu pada data-data sebagai berikut (Firdianda, Aisjah, & Masroeri, 2013);  $\omega_0 = 0.4 \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ ,  $\zeta = 0.1$ , dan  $K_w = 2\zeta\omega_0\tau_\omega$ . Dimana  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $H = 4-6 \text{ meter}$ ,  $\tau_\omega = 3.16$ . Sehingga model gelombang laut pada persamaan di atas menjadi sebagai berikut :





$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.018 \\ 0 & 0 & -0.088 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$C = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$E = \begin{bmatrix} E_L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -3.277 & -10.351 & -10.354 \\ -15.55 & -2.925 & -49.137 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ -15.638 & -49.404 & -3.222 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0.323 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0.323 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & 0 & 0 & 0.323 \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Masing-masing matrik diatas merupakan matrik gabungan dengan kondisi gangguan kondisi frekuensi rendah dan frekuensi tinggi sehingga menghasilkan matriks masing-masing 12x12. Sedangkan model pengukuran ditunjukkan dalam matriks z.

Dengan variabel keadaan sebagai berikut :

$$x = [y_L, \phi_L, \psi_L, v_L, p_L, r_L, \xi_y, \xi_\phi, \xi_\psi, y_H, \phi_H, \psi_H]^T, \quad u = \tau_R$$

$$w = [w_v, w_p, w_r, w_y, w_\phi, w_\psi]^T.$$

$$z_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_L \\ \phi_L \\ \psi_L \\ v_L \\ p_L \\ r_L \\ y_H \\ \phi_H \\ \psi_H \\ \xi_y \\ \xi_\phi \\ \xi_\psi \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

### 3.5 Validasi Keterkendalian dan Keteramatan model state space dari Plant

Matriks diatas sebagai model pengukuran dalam frekuensi tinggi sesuai dengan persamaan 2.16. Dalam merancang sistem kendali pada *Linier Quadratic Gaussian* (LQG) faktor yang harus dipenuhi adalah kondisi *controlability* dan *observability*. Syarat *controlability* adalah sebagai berikut:

$$P_c = [BABA^2B \dots A^{k-1}B] \quad (3.12)$$

Sedangkan syarat *observability*:

$$P_o = [C'A'C'A'^2C' \dots A'^{k-1}C'] \quad (3.13)$$

Syarat-syarat diatas diperlukan untuk mengidentifikasi apakah kondisi sistem sudah dapat dikatakan stabil atau tidak. Sehingga untuk uji kestabilan menggunakan syarat-syarat tersebut. Uji kondisi dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* matlab 2009a didapatkan nilai rank  $P_c = 8$  dan  $P_o$  memiliki nilai rank = 3. Sehingga model state space masih terkendali dan termati.

### 3.6 Pemodelan Gangguan Gelombang

*Disturbance* dalam merancang sistem kendali pada tugas akhir ini adalah berupa gangguan gelombang. Gangguan gelombang pada alur lintasan pelayaran Tanjung Perak dimodelkan dalam bentuk fungsi transfer orde-2 seperti yang terdapat pada persamaan 2.21. Pemodelan gelombang tersebut divariasikan dalam bentuk beberapa ketinggian gelombang.

Pemodelan sebagai berikut:

$$h(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.14)$$

Ketika ketinggian gelombang mencapai 4 meter sesuai dengan tinggi gelombang yang ada pada sea state 6

$$\omega_0 = 0,4 \sqrt{\frac{g}{H}} = 0,4 \sqrt{\frac{9,8}{H}} = 0,4 \times 3,13049 \times H^{-0,5} = 0.5112$$

$$-2\zeta\omega_0 = -2 \times 0,1 \times 0.5112 = -0.1023$$

Nilai H didapatkan pada tabel 2.3 dengan *sea state* pada kondisi 6 dan diambil nilai rata-rata.

$$-\omega_0^2 = -0.2613$$

Sesuai dengan persamaan 2.8 untuk mendapatkan konstanta gain dari gelombang maka menghasilkan

$$K_w = 2\pi\omega_0\tau_w$$

Dengan nilai  $\tau_w = 3.16$  maka,

$$K_w = 2 \times 0,1 \times 0.5112 \times 3.16$$

$$K_w = 0.323$$

Maka model gangguan menjadi sebagai berikut :

$$h(s) = \frac{0.323 s}{s^2 + 0.1023 s + 0.2613} \quad (3.15)$$

Persamaan diatas merupakan pemodelan pendekatan dinamika gangguan yang disebabkan oleh gelombang. Pemodelan tersebut didapatkan dari pendekatan gelombang yang dikembangkan oleh Pierson dan Moskowitz (1963).

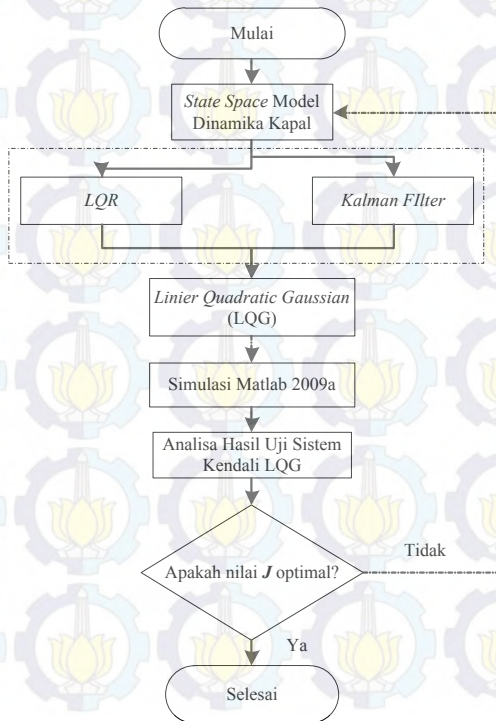
Sedangkan untuk pemodelan gelombang dengan sudut 30 adalah sebagai berikut, untuk  $\beta = 30^\circ$  maka dan  $\omega = 0.5112$

$f(\beta) = f(30) = 0.4777$  dan  $S(\omega) = S(0.5112) = 0.013471278$  dan  $K_w = 0.008201681$ , maka persamaan gangguan orde duanya adalah sebagai berikut :

$$h(s) = \frac{0.0082s}{s^2 + 0.1023s + 0.2613}$$

### 3.7 Desain Sistem Kendali

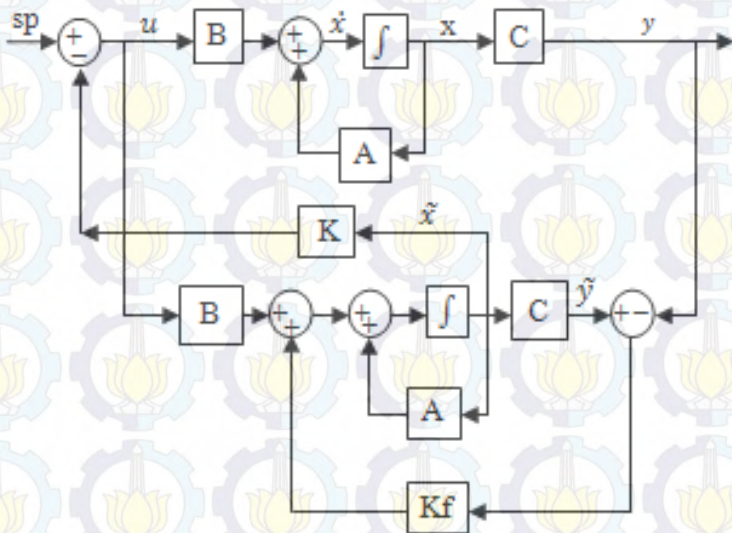
Pada tahapan ini akan dilakukan perancangan sistem pengendalian menggunakan metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) setelah dilakukan pemodelan sistem. Perancangan dimulai dengan pemodelan *state space* dinamika kapal. Respon sinyal keluaran yang dianalisa adalah *sway*, *yawrate*, sudut *heading*. Tahapan perancangan sistem kendali LQG dijelaskan sebagai berikut:



**Gambar 3.2** Flowchart Perancangan Sistem Kontrol LQG



Dalam mendesain sistem kendali *Linier Quadratic Gaussian* (LQG) diperlukan model persamaan *state space* plant agar dapat dilakukan perancangan. Salah satu syarat agar sistem kontrol tersebut dapat stabil, maka kondisi matriks plant harus memiliki keadaan *controllability* dan *observability*. Setelah kondisi tersebut tercapai maka dapat dilakukan perancangan *regulator* dan *estimator*. Regulator disini sebagai fungsi kontrol dengan metode *linier quadratic regulator* (LQR) dimana nilai  $u$  merupakan sinyal kontrol input. Harga  $u = -Kx$ .  $K$  sebagai *gain regulator* dimana nilainya berupa matriks. Perhitungan tersebut dilakukan dengan bantuan *software* matlab. Selain itu, nilai  $K$  juga mempengaruhi dalam menentukan nilai indeks performansi. Semakin kecil nilai indeks performansi, maka sistem akan semakin optimal. Apabila nilai indeks performansi besar maka sistem tidak akan optimal. Untuk lebih jelas dalam memahami kontrol LQG dapat dilihat pada gambar diagram blok berikut :



**Gambar 3.3** Block Diagram Perancangan Sistem Kontrol LQG



Indeks Performansi	$J(t_o) = \frac{1}{2} \int_{t_o}^T (x^T Q x + u^T R u) dt$ <p>Syarat : <math>S(T) \geq 0, Q \geq 0, R &gt; 0</math></p>
<i>Riccati Equation</i>	$-\dot{S} = A^T S + S A - S B R^{-1} B^T S + Q, \quad t \leq T, S(T)$
<i>Gain Kalman</i>	$K = R^{-1} B^T S$
<i>Time varying feedback</i>	$u = -K(t)x$

Perancangan *estimator* dilakukan dengan menghitung harga umpan balik (filter kalman) kemudian mengestimasi variabel keadaan optimal  $\hat{x}$  diperoleh dari sistem dinamik filter kalman sebagai berikut :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - \hat{y}) \quad (3.14)$$

Kemudian mencari nilai *gain*/penguatan Kalman filter :

$$K_f = P C^T R_f^{-1} \quad (3.15)$$

Sedangkan Matriks  $P$  diperoleh dari persamaan *Riccati* :

$$0 = P A^T + A P - P C^T R_f^{-1} C P + Q_f \quad (3.16)$$

Dari persamaan-persamaan diatas digunakan untuk mendesain sebuah estimator. Nilai estimator bergantung pada kondisi penguat/*gain* kalmannya. Sehingga dapat diketahui apakah estimator mampu mengestimasi variabel keadaan atau tidak. Algoritma filter Kalman dapat dituliskan sebagai berikut:

**Tabel 3.2** Algoritma perancangan *estimator* (Lewis, 1993)

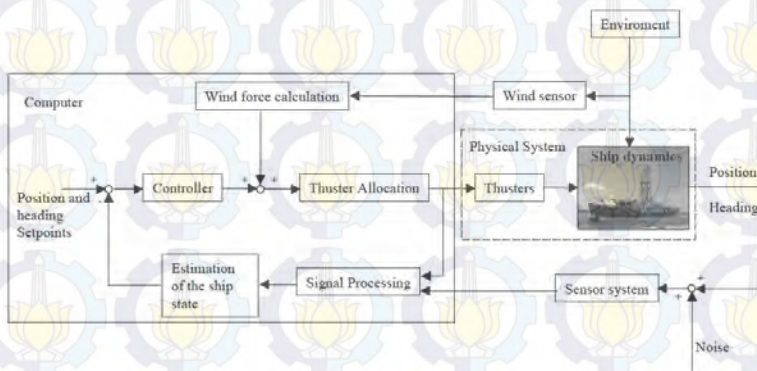
1	$\bar{x}_0 = x_0$
2	$\bar{X}(0) = E[(x(0) - \hat{x}(0))(x(0) - \hat{x}(0))^T] = X_0$
3	$K(t) = \bar{X}(t) H^T R^{-1}(t)$



4	$\dot{\hat{x}} = A(t)\hat{x}(t) + B(t)\hat{u}(t) + K(t)[z(t) - H(t)\hat{x}(t)]$
5	$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + X(t)A^T(t) + E(t)Q(t)E^T(t) + X(t)H^T(x)R^{-1}(t)H(t)X(t)$

### 3.8 Perancangan Kontrol Stabilisasi Platform

Pada subbab ini akan dijelaskan perancangan model kontrol stabilisasi platform menggunakan metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG).



**Gambar 3.5** Block Diagram Perancangan Kontrol Stabilisasi (Aranda, 2004)

Gambar 3.6 merupakan diagram blok sistem kontrol stabilisasi dengan gangguan berupa gelombang. Inputan kontrol berupa error *yawrate*, dan *swayrate*. Sedangkan outputan dari kontroler berupa sinyal *thruster*. Kemudian sinyal tersebut masuk ke aktuator yang berupa 2 buah *rotatable (azimuth) thruster* dan dirubah kedalam bentuk sudut pada *thruster*. Model dinamika platform akan merubahnya dalam bentuk sudut *heading* dan kecepatan arah *sway*. Hal inilah yang membuat platform tetap stabil dalam posisinya. (Yamamoto, 2005)

### 3.9 Pengujian Simulasi

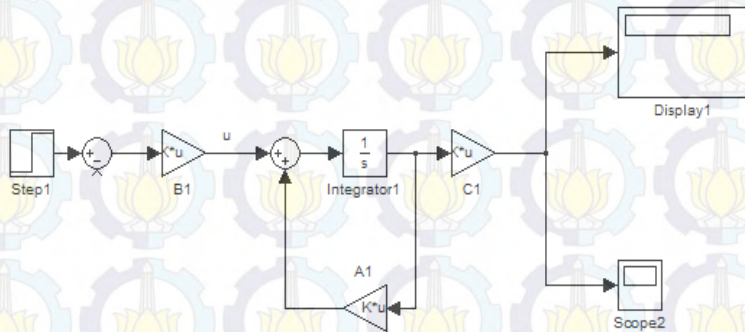
Pengujian simulasi dilakukan untuk melihat respon sistem secara *open loop* maupun *close loop*. Uji open loop dilakukan



tanpa menggunakan kontroler, tujuannya untuk mengetahui respon transien dinamika kapal. Kemudian uji simulasi secara close loop digunakan untuk menguji kondisi plant dengan menggunakan kontroler LQG. Selain itu, uji close loop dilakukan dengan menggunakan variasi gangguan gelombang.

### 3.9.1 Uji Open Loop

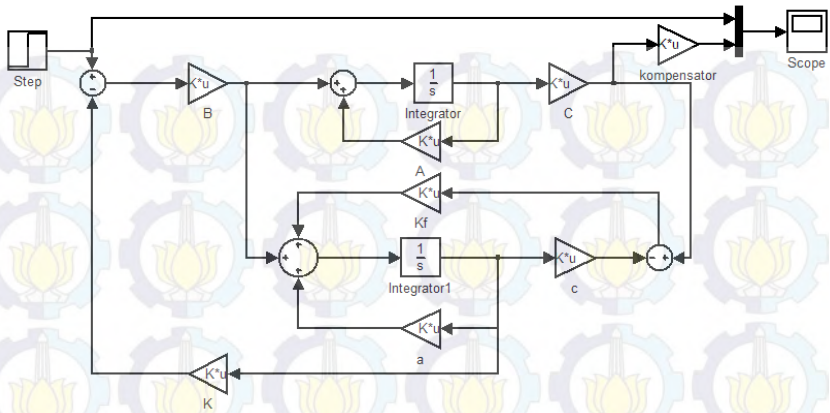
Model simulasi open loop digunakan untuk melihat kondisi respon kapal ketika tanpa kontroler LQG. Uji open loop dilakukan juga untuk melihat respon transien dari plant yang akan diuji.



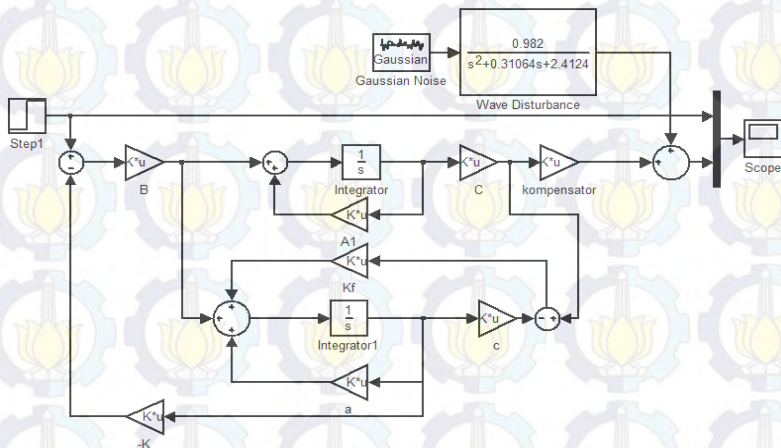
**Gambar 3.6** Model simulasi *Open Loop Platform*

### 3.9.2 Uji Close Loop

Model simulasi closed loop digunakan melihat respon keluaran sinyal kontrol berupa *sway* dan *yawrate*. Sistem menggunakan kendali LQR dan Kalman filter sebagai estimatornya. Uji ini dilakukan dengan menggunakan disturbance maupun tanpa menggunakan disturbance kemudian dianalisa perbedaan dari masing-masing kondisi. Berikut ini merupakan model simulasi pada program simulink matlab.



**Gambar 3.7** Model simulasi *Closed Loop* tanpa Gangguan



**Gambar 3.8** Model simulasi *Closed Loop* dengan Gangguan

### 3.10 Analisa Performansi

Analisa performansi dilakukan untuk melihat kondisi respon sistem ketika dilakukan uji menggunakan *software matlab*. Uji coba sistem dengan menggunakan kontrol stabilisasi pada *platform* baik terdapat gangguan atau tanpa gangguan gelombang. Performansi dari hasil uji sistem apakah mampu mencapai target stabil atau tidak, serta kontrol LQG mampu mengurangi nilai error yang diakibatkan oleh adanya gangguan gelombang.

### 3.11 Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan disusun mulai dari awal hingga akhir proses desain kontrol stabilisasi pada semi-submersible platform menggunakan metode kontrol optimal LQG berdasarkan kondisi-kondisi tanpa gangguan maupun dalam kondisi ketika terdapat gangguan gelombang pada *seastate* 6.





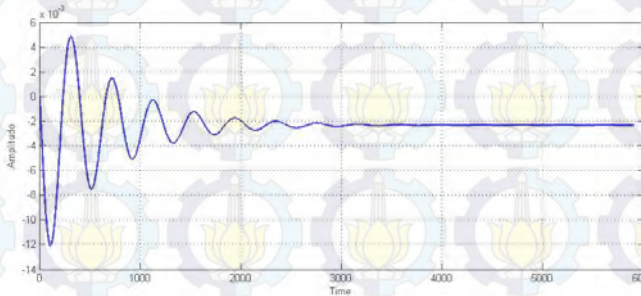
## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Sistem Kontrol Stabilisasi LQG

Pada bab ini dilakukan Analisis dari hasil perancangan sistem kendali untuk *optimal stabilization* pada *Platform ohshore structure*. Uji sistem kontrol dilakukan dengan cara uji yang didasarkan pada standar ada.

### 4.2 Analisis Hasil Uji Plant Secara *Open Loop*

Uji *open loop* digunakan dalam mengetahui respon dari platform dengan inputan bernilai sinyal step untuk mengetahui respon platform dalam kondisi tanpa kontroler LQG. Berikut ini respon yang diperoleh ketika dalam kondisi *open loop*:



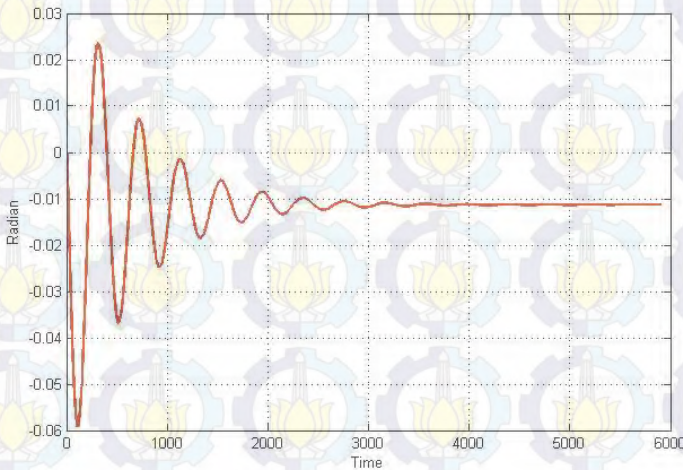
**Gambar 4.1.** Respon *Open Loop* arah *sway* dari Platform PQ

Pada uji sistem open loop inputan yang digunakan bernilai sinyal step. Hasil uji yang terdapat pada gambar 4.1 didapatkan bahwa respon platform berosilasi kemudian stabil pada waktu ke 300, dalam grafik masih bernilai satu per sepuluh sehingga stabil pada waktu ke 30, ini masih dalam non dimensional jika dalam detik maka 108 s. Pada uji open loop tersebut sistem dapat stabil namun perlu sebuah kontroler untuk dikendalikan agar inputan yang diberikan menghasilkan output yang diinginkan berdasarkan setpoint.

Pada gambar 4.1 dapat diketahui bahwa respon open loop dari gaya *sway* memiliki *maximum overshoot* sebesar 0.012 dengan *error steady state* 2%. Nilai dari uji *sway* yang diperbolehkan untuk dapat dikatakan bahwa platform dalam

keadaan stabil sebesar 2%-6% dari kedalaman platform (Yamamoto, 2005). Karena nilai dari overshoot diatas masih dalam bentuk non-dimensional maka dikonversi kedalam bentuk dimensional sehingga didapatkan nilai sebesar 1.536 m. Jadi hasil respon open loop dari sistem ini masih berada pada daerah stabil.

Kemudian dilakukan uji *open loop* arah sudut yaw dengan hasil sebagai berikut :



**Gambar 4.2.** Respon *Open Loop* arah yaw dari Platform PQ

Hasil uji yang terdapat pada gambar 4.2 didapatkan bahwa respon platform beresilasi kemudian stabil pada detik ke 1100. Dapat dilihat juga bahwa respon *open loop* dari gaya yaw memiliki maximum *overshoot* sebesar 0.06 dengan error steady state sebesar 1% dan terlihat stabil dalam waktu 350 dalam grafik masih bernilai satu per sepuluh sehingga stabil pada waktu ke 35 atau 126s. Nilai *Yawing* yang diperbolehkan untuk tetap menjaga platform dalam keadaan stabil sebesar  $20^\circ$  atau setara dengan  $\pm 0.34$  rad. Sehingga dapat diketahui bahwa pada open loop sistem masih berada pada daerah kestabilan dari sistem dinamika platform. (Congley, 2010)

Pengujian kestabilan plant juga di uji dengan mengetahui *eigen value* dari dinamika plant didapatkan *eig* (*A*) :

$$eig(A) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.84 \\ -3.946 \\ -0.102 \\ -0.102 \\ -0.102 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa plant stabil karena tidak ada perubahan tanda pada nilai *eigen value* dan dibuktikan dengan uji *open loop* yang dilakukan dengan input step. (Ogata, 2002)

Sehingga dengan hasil *open loop* dan nilai *eigen value* yang didapatkan maka diperlukan sebuah kontrol untuk menjaga stabilisasi dari Platform agar dapat kembali ke posisi semula.

#### 4.3 Implementasi Sistem Kontrol LQG

Sebelum melakukan uji *closed loop* terlebih dahulu melakukan perancangan sistem kendali LQG. Implementasi sistem kendali LQG terlebih dahulu dilakukan perancangan kalman filter dan *Linear Quadratic Regulator* (LQR).

##### 1. Perancangan *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

Berdasarkan hasil pemodelan dinamika platform pada persamaan 2.25 didapatkan fungsi state space  $\dot{x} = Ax + Bu$ ,  $y = Cx + Du$ . Selain itu, syarat umum untuk mendesain sebuah kontrol optimal nilai matriks harus memenuhi kondisi controllability dan observability untuk memenuhi kestabilan dari sistem tersebut. Matrik Q dan R bernilai matrik diagonal dengan orde 12x12. Kemudian untuk mendapatkan nilai gain regulator menggunakan fungsi pada matlab yaitu  $[K,S,E]=LQR(SYS,Q,R,N)$ . Secara otomatis pada matlab akan menampilkan nilai K dan S. Untuk nilai K merupakan gain regulator dan S sebagai solusi persamaan riccati. Matrik







Kondisi paling optimal didapatkan pada variasi nilai matrik pembobotan dengan nilai  $Q=0.001$  dan nilai  $R=0.001$ . Hal ini dikarenakan sistem akan optimal dengan nilai indeks performansi yang paling minimum yakni bernilai 0.05677. Nilai matrik pembobotan yang optimal tersebut digunakan untuk merancang gain regulator pada sistem kontrol Linear Quadratic Regulator (LQR). Apabila nilai  $Q$  dan  $R$  telah didapatkan, kemudian dimasukkan kedalam fungsi LQR pada fungsi editor matlab2009a yang menghasilkan matrik  $K$  dan  $S$  sebagai berikut

$K =$  Columns 1 through 7

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
-0.0030	-0.0006	0.0000	-0.0012	0.0001	0.0002	-0.2325
-0.0030	-0.0006	0.0000	-0.0012	0.0001	0.0002	0.0000
-0.0035	-0.0022	0.0002	-0.0016	-0.0015	0.0005	-0.0000
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0.8583	-0.3422	-0.3823	0.8015	-0.4191	-0.4314	-0.0035
-0.3720	0.0982	-0.9230	-0.3675	0.0967	-0.9300	0.0015
-0.3533	-0.9345	0.0430	-0.2133	-0.8916	0.0560	0.0024

Columns 8 through 12

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0.0000	-0.0000	1.4566	-0.0000	-0.0000
-0.2325	-0.0000	-0.0000	1.4566	-0.0000
-0.0000	-0.2325	-0.0000	-0.0000	1.4566
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
-0.0035	-0.0033	-0.0008	-0.0008	-0.0010
0.0015	0.0014	0.0001	0.0001	0.0004
0.0024	0.0026	0.0012	0.0012	-0.0012

Columns 1 through 7

$S =$

0.0014	-0.0000	-0.0000	0.0004	-0.0001	-0.0001	0.0000
-0.0000	0.0010	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0010	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
0.0004	-0.0000	-0.0000	0.0003	-0.0001	-0.0001	0.0000
-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0000
0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0008
0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0002
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Columns 8 through 12

0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	-0.0002	0.0000	0.0000
0.0008	-0.0000	0.0000	-0.0002	0.0000
-0.0000	0.0008	-0.0000	-0.0000	-0.0002
0.0000	-0.0000	0.0015	-0.0000	-0.0000
-0.0002	-0.0000	-0.0000	0.0015	-0.0000
0.0000	-0.0002	-0.0000	-0.0000	0.0015

## 2. Perancangan Estimator Filter Kalman

Perancangan estimator pada LQG menggunakan sebuah filter yaitu filter kalman. Fungsi dari kalman filter sebagai memperkecil adanya gangguan platform ketika melakukan stabilisasi. Salah satu syarat untuk memilih nilai indeks performansi dari gain kalman yaitu dengan memilih nilai yang paling minimum dengan berbagai variasi nilai matrik pembobotan. Nilai tersebut dapat ditunjukkan pada tabel berikut ini :

**Tabel 4.2.** *IndexPerformance* matriks pembobot  $Q_n$  dan  $R_n$  pada gain filter kalman

NO	$Q_n$	$R_n$	J
1	0.0001	1	64.925
2	0.001	1	64.918
3	0.01	1	64.845
4	0.1	1	64.111
5	0.0001	0.0001	0.00567
6	1	1	56.77
7	1	10	641.108
8	0.1	10	648.446
9	0.1	0.1	5.67
10	0.1	0.01	0.166

Berdasarkan hasil tabel diatas diperoleh kondisi matrik pembobotan  $Q_n$  dan  $R_n$ . Didapatkan nilai hasil uji indeks performansi sistem dengan nilai kondisi bobot matrik masing-masing bernilai 0.0001 dan 0.0001 Matrik tersebut bernilai matrik diagonal. Matrik diagonal dituliskan sebagai berikut :

[illegible]

$$K_f =$$

Columns 1 through 7

1.7396	0.6732	1.4151	0	0	0
0.5749	7.5921	0.3146	0	0	0
1.2960	0.2960	10.2305	0	0	0
2.4063	3.4406	6.7881	0	0	0
3.2902	27.1746	-1.1278	0	0	0
9.6394	6.5638	51.4268	0	0	0
0.5981	-0.0401	-0.1358	0	0	0
0.0583	-0.1679	-0.0488	0	0	0
-0.0167	-0.0302	-0.1565	0	0	0
-0.6342	0.0367	0.1024	0	0	0
0.0483	-0.2352	0.0520	0	0	0
0.0755	-0.0518	-0.0502	0	0	0

Columns 8 through 12

[illegible]



P =

Columns 1 through 7

0.0003	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0010	-0.0001
0.0001	0.0011	0.0000	0.0003	0.0029	0.0007	-0.0000
0.0002	0.0000	0.0014	0.0007	-0.0001	0.0053	-0.0000
0.0003	0.0003	0.0007	0.0024	0.0048	0.0090	-0.0000
0.0004	0.0029	-0.0001	0.0048	0.0292	0.0043	-0.0000
0.0010	0.0007	0.0053	0.0090	0.0043	0.0541	-0.0001
-0.0001	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	0.0002
0.0000	-0.0004	0.0000	0.0000	-0.0002	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	-0.0004	0.0000	-0.0000	-0.0002	0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	-0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0002	0.0001	-0.0000
0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0004	-0.0000

Columns 8 through 12

0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
-0.0004	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0004	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0002	-0.0000	0.0000	0.0002	-0.0000
-0.0000	-0.0002	0.0001	0.0001	0.0004
0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0004	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	-0.0000
0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	-0.0000
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0002

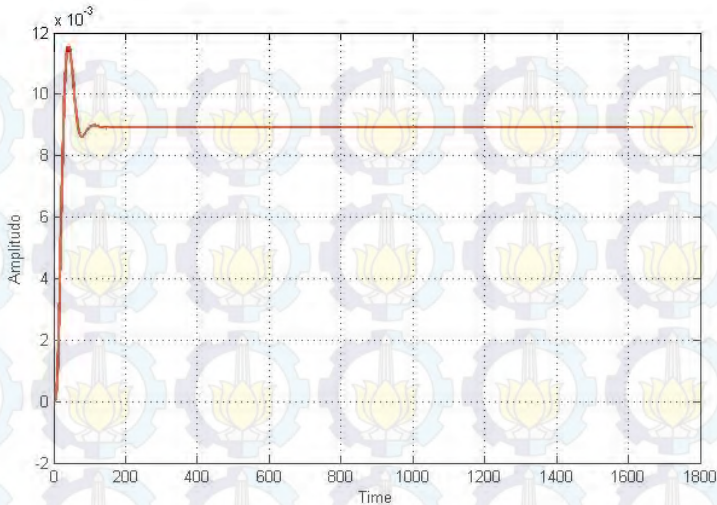
#### 4.4 Analisis Hasil Uji Platform Secara *Closed Loop* dengan Kontrol LQG

Pada sub bab ini terdapat hasil simulasi secara *closed loop* dengan kecepatan arah *sway* dan *yaw*.

##### 4.4.1 Analisis Hasil Uji Secara *Closed Loop* *sway* dan *yaw* Tanpa Gangguan

Uji *closed loop* dilakukan untuk mengetahui kemampuan platform untuk performansi sistem kendali pada platform tersebut. Selain itu uji ini dilakukan untuk mengetahui kondisi sebuah sistem kendali yang telah dirancang sudah mengikuti *setpoint* yang telah diinginkan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan Berikut ini pada gambar 4. merupakan hasil respon uji tracking setpoint pada gerakan *sway* :

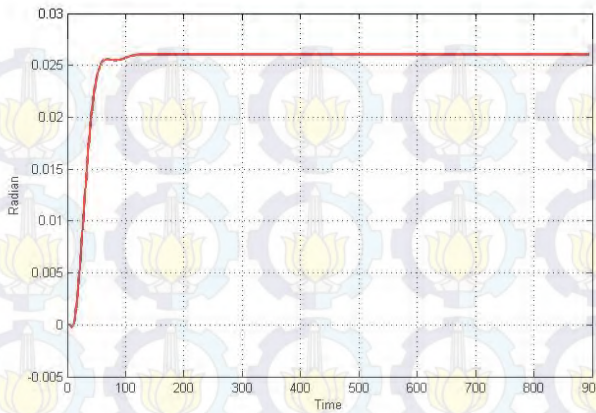




**Gambar 4.3.** Grafik respon arah *sway* tanpa gangguan

Dari gambar respon dapat diketahui kalau platform diberi set point maka terlihat ketika arah *sway* platform akan stabil setelah 100 dalam grafik masih bernilai satu per sepuluh sehingga stabil pada waktu ke 10 masih dalam non dimensional atau sekitar 36s dan bergeser ke arah 0.009, jika dikali dengan  $L_{pp}$  maka menyimpang sebesar 1.161 m hal ini masih diperbolehkan karena batas menyimpang masih kurang 2 % dari kedalaman.<sup>[20]</sup>

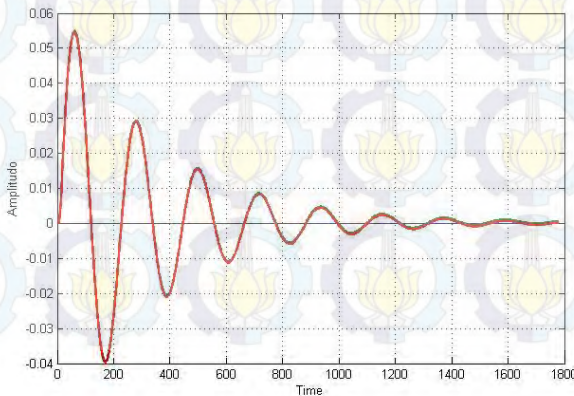
Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa respon arah sudut *yaw* dapat mengikuti *setpoint* yang telah ditentukan, dengan gambar sebagai berikut :



**Gambar 4.4.** Grafik respon arah sudut *yaw* tanpa gangguan

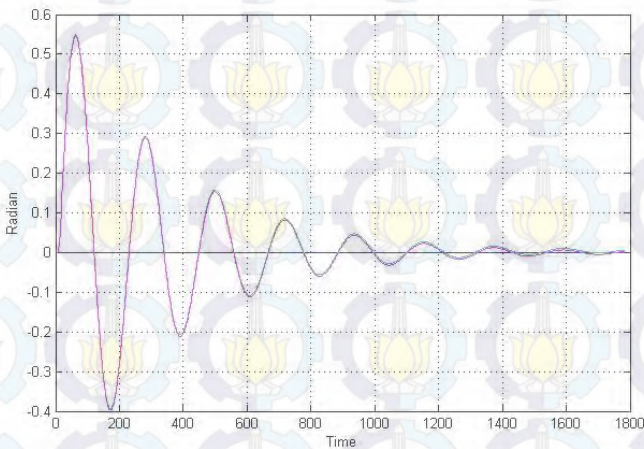
Dari gambar respon dapat diketahui kalau platform diberi set point maka terlihat waktu dibutuhkan ketika arah sudut *yaw* untuk stabil sekitar 120 dalam grafik masih bernilai satu per sepuluh sehingga stabil pada waktu ke 12 masih dalam non dimensional atau sekitar 43.2 s, dan platform bergeser ke arah 0.0256 radian, hal ini masih diperbolehkan karena batas menyimpang masih kurang dari 0.35 sudut radian.<sup>[13]</sup>

#### 4.4.2 Analisis Uji Respon *Sway* dan *Yaw* secara *close loop* dengan gangguan



**Gambar 4.5** Grafik respon arah *sway* dengan gangguan

Pada uji ini dilakukan pengujian terhadap respon sinyal kontrol pada *sway* dan sudut *yaw* yang diberi gangguan gelombang. *Sway* merupakan gerak translasi platform kearah kesamping. Sedangkan sudut *yaw* merupakan gerak sudut rotasi platform pada sumbu atas bawah. Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa respon arah *sway* dapat mengikuti gangguan yang diberikan, dengan periode platform untuk kembali normal pada 180 dalam grafik masih bernilai satu per sepuluh sehingga stabil pada waktu ke 18 atau 64.8s.

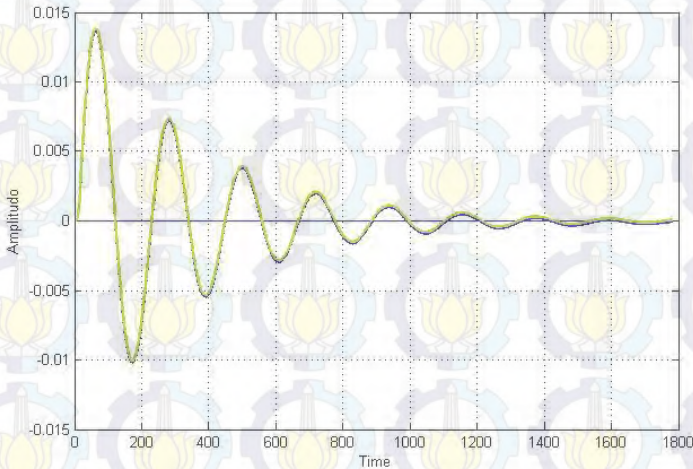


**Gambar 4.6** Grafik respon sudut *yaw* dengan gangguan

Pada Gambar 4.6 terlihat respon sudut *yaw* ketika dilakukan uji gangguan gelombang. Respon sistem tersebut mampu mengikuti gangguan. Hasil dari respon tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem kendali mampu memerintahkan *thruster* platform agar sesuai dengan *setpoint* sudut *yaw* yang telah ditentukan. Berdasarkan respon tersebut, kontrol mampu memberikan pada *thruster* sinyal control dengan baik sehingga platform mampu mengikuti sudut *yaw* yang telah ditentukan sebelumnya. Selain itu kemampuan platform dalam melakukan gerakan *yaw* juga dapat mempengaruhi respon sinyal kontrol dalam melakukan pemenuhan *setpoint*.

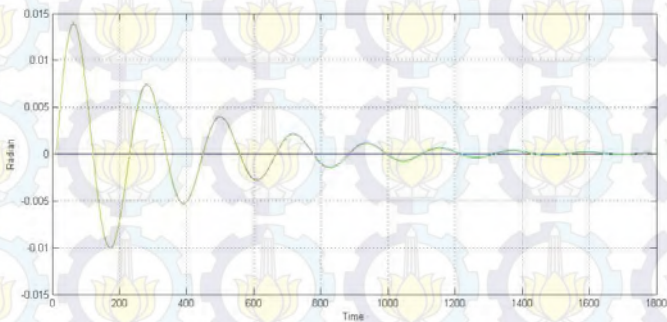


#### 4.4.3 Analisis Uji Respon *Sway* dan *Yaw* secara *close loop* dengan gangguan gelombang sudut 30



**Gambar 4.7** Grafik respon arah *sway* dengan gangguan gelombang sudut 30

Dari Gambar 4.7 terlihat bahwa kontrol masih dapat mengikuti gangguan gelombang arah sudut 30 terhadap arah *sway* dengan baik dengan periode platform untuk kembali normal pada 120 atau 432s.



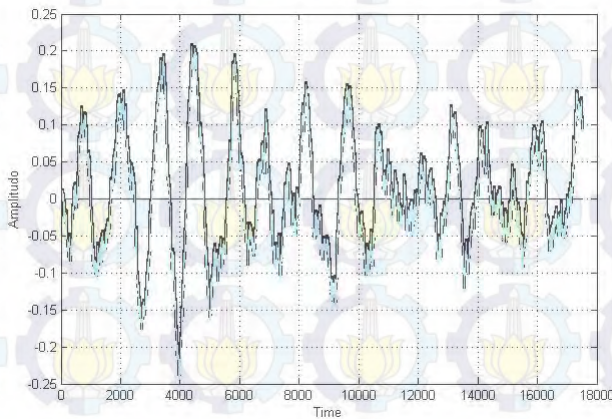
**Gambar 4.8** Grafik respon arah *yaw* dengan gangguan gelombang sudut 30



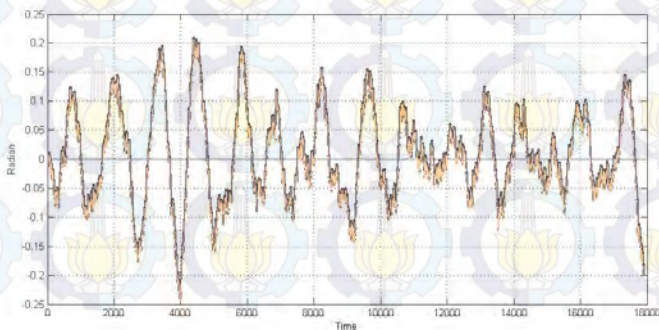
Dari Gambar 4.8 juga masih terlihat bahwa kontrol masih dapat mengikuti gangguan gelombang arah sudut 30 terhadap arah *sway* dengan baik.

#### 4.4.4 Analisis Hasil Uji Respon *Sway* dan *yaw* secara *close loop* dengan gangguan gaussian

Uji respon dalam kondisi gangguan gelombang dilakukan untuk mengetahui kemampuan platform untuk mengikuti gangguan yang diinginkan. Gangguan Gaussian diberikan untuk mengetahui kehandalan kontrol yang diberikan



**Gambar 4.9.** Grafik respon sistem arah *sway* saat uji dengan gangguan Gaussian



**Gambar 4.10.** Grafik respon sistem arah sudut *yaw* saat uji dengan gangguan Gaussian

Dari Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 terlihat bahwa sistem kontrol masih dapat mengikuti gangguan fungsi Gaussian  $f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\}$  yang diberikan. Sehingga hasil yang didapatkan bahwa sistem kendali LQG masih dapat mengendalikan untuk dapat mengikuti set point yang diinginkan. Secara keseluruhan hasil uji dengan menggunakan gangguan konstan maupun dengan menggunakan gaussian noise, sistem kendali mampu mengatasi gangguan tersebut. Hal ini membuktikan bahwa sistem LQG bersifat robust terhadap gangguan yang berupa gelombang.



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil perancangan sistem kontrol *stabilization* yang telah dilakukan, maka dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa telah didapatkan desain kriteria sistem kontrol *stabilization* pada platform Atlantis PQ dengan menggunakan metode kontrol optimal *Linear Quadratic Gaussian*. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, kapal mampu mengikuti target set point yang ditentukan, sehingga didapatkan :

1. Perancangan gain regulator dan gain kalman dengan performansi yang optimal masing-masing didapatkan untuk nilai  $Q=0.001$ ,  $R=0.001$  dan nilai  $Q_n=0.0001$ ,  $R_n=0.0001$ .
2. Sistem kendali LQG mampu melakukan aksi pengendalian dengan gangguan gelombang dan Gaussian, platform masih menyimpang dalam rentang yang diperbolehkan 2%-6% dari kedalaman untuk arah sway dan 0.34 radian. sehingga platform masih mampu mengikuti set point.
3. Error set point kecil sehingga untuk mendapatkan kondisi yang optimal sistem dikatakan mampu mengatasi gangguan, karena error tersebut masih dalam batas yang diperbolehkan.

#### **5.2 Saran**

Penelitian ini masih perlu dilakukan pengembangan, maka saran yang disampaikan dalam laporan tugas akhir ini adalah dilakukan penambahan variasi uji gangguan berupa arus laut dan gangguan angin. Untuk memperbaiki performansi sistem kendali *linier Quadratic Gaussian* (LQG) dapat diumpankan ke kontrol *fuzzy logic* yang di adaptif dengan LQG untuk mengatur variabel kecepatan dan posisi sudut yang diinginkan dan Pemodelan platform dapat dilakukan dengan model 2 hull.





## LAMPIRAN A

### PEMODELAN DINAMIKA *PLATFORM*

Dinamika *platform* dimodelkan berdasar dari spesifikasi *platform*. *Platform* yang digunakan adalah *platform semi-submersible* milik BP PLC dan BHP Biliton yang diberi nama *Atlantis PQ Platform*. Berikut spesifikasi umum dari *Atlantis PQ Platform*:

<i>Class &amp; Type</i>	: <i>Moored Semi-Submersible ABS Classed &amp; Certified "Floating Offshore Installation"</i>
<i>Tonnage</i>	: 30,882 metric tons
<i>Displacement</i>	: 88,826 metric tons
<i>Length (Lpp)</i>	: 129,07 m
<i>Beam (B)</i>	: 116,1 m
<i>Draught (T)</i>	: 26 m
<i>Depth</i>	: 52 m

Pemodelan dilakukan berdasarkan model matematis yang diturunkan Model *Van Amerongen* dan *Van Capelle*. (Fossen, 2002) :

$$\frac{-Y_v''}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_{BB}}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{T}\right)^2$$

$$\frac{-Y_v''}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.4 \frac{C_{BB}}{T}$$

$$\frac{-Y_r''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-Y_p''}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.08 \frac{B}{T}$$

$$\frac{-Y_r''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-Y_p''}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \frac{B}{L} - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2$$

$$\frac{-N_r''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_p''}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L}$$

$$\frac{-N_r''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_p''}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_{BB}}{T} - 0.33 \frac{B}{L}$$

$$\frac{-N_v''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_v''}{\pi(T/L)^2} = 0.5 \frac{B}{L} + 2.4 \left(\frac{B}{T}\right)^2$$

$$\frac{-N_v''}{\pi(T/L)^2} = \frac{-K_v''}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \frac{B}{L} - 0.041 \frac{B}{T}$$

Berdasar spesifikasi yang diketahui, koefisien-koefisien tak berdimensi dengan notasi (") dapat diketahui.

$Y_v''$	$Y_r'' = Y_p''$	$N_v'' = K_v''$	$N_r'' = K_p''$
<b>0.34614</b>	-0.06841	-0.10275	0.02166
$Y_v''$	$Y_r'' = Y_p''$	$N_v'' = K_v''$	$N_r'' = K_p''$
<b>0.00315</b>	-0.14292	-0.12531	0.01014
$I_x''$	$Z_g''$		$I_r''$
<b>9.3276E - 06</b>	7.6264E - 06		0.07085

Kemudian dapat dibentuk menjadi matrik sebagai berikut

:

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_v & -mZ_G - Y_p & mX_G - Y_r \\ -mZ_G - K_v & I_x - K_p & 0 \\ mX_G - N_v & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

$$\text{dan } D = \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_p & mu_0 - Y_r \\ -K_v & -K_p & -mZ_G u_0 - K_r \\ -N_v & -N_p & mX_G u_0 - N_r \end{bmatrix} \text{ dan } \tau_L = TKu \text{ dengan}$$

$$\tau_L = [Y \ K \ N]^T$$

sehingga

$$-M^{-1}D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \text{ dan } -M^{-1}B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

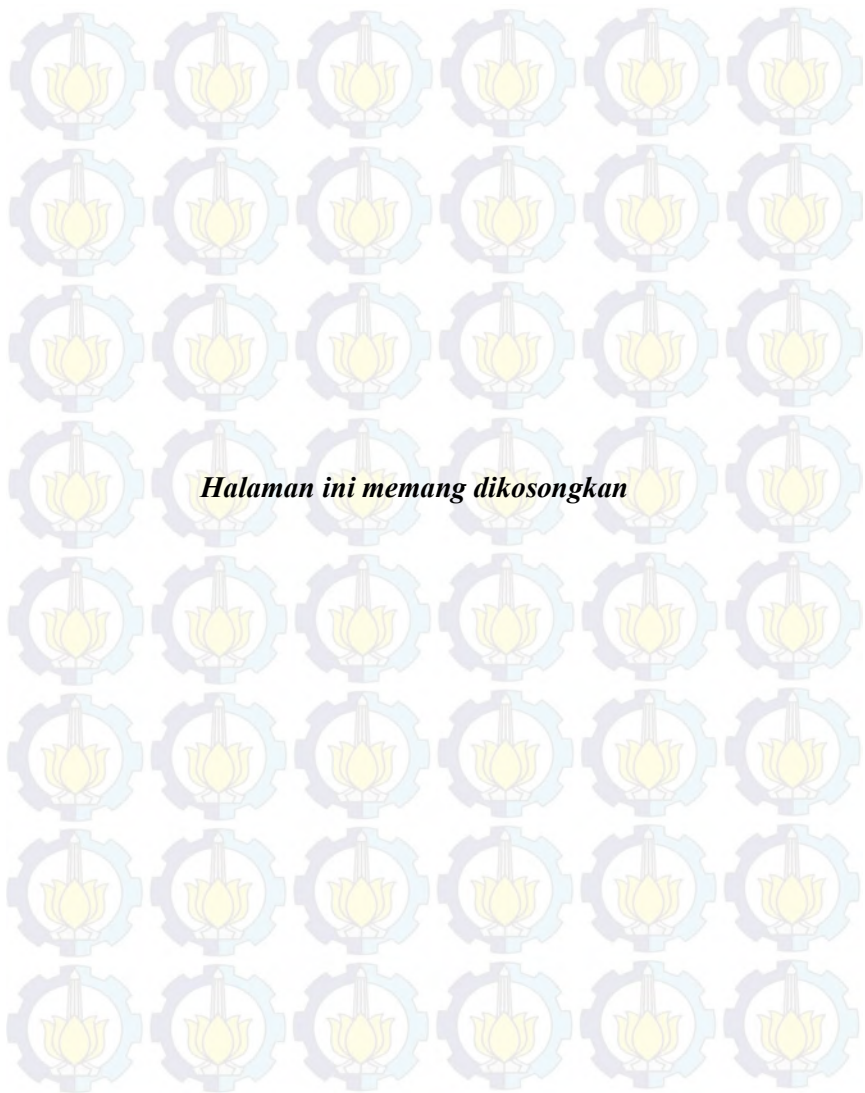
$$-M^{-1}D = \begin{bmatrix} -2.584 & -0.363 & -0.363 \\ -6.475 & -2.193 & -1.724 \\ -6.545 & -1.734 & -2.202 \end{bmatrix} -M^{-1}B = \begin{bmatrix} -0.018 \\ -0.025 \\ -0.088 \end{bmatrix}$$

Kemudian dilakukan *Decompositions in Roll and Sway-Yaw Subsystems*, (Fossen, 2002) :

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{31} & a_{33} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_R$$

maka persamaa akhir *state space* menjadi, sebagai berikut :

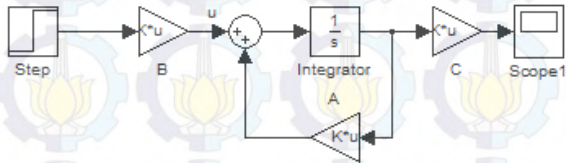
$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.584 & -0.363 & 0 \\ -6.545 & -2.202 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.018 \\ -0.088 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_R$$



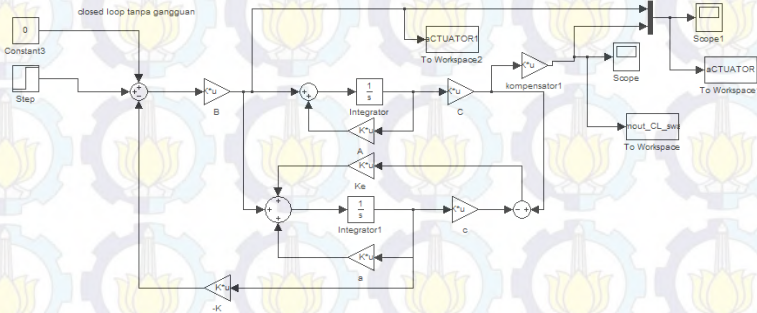


## LAMPIRAN B

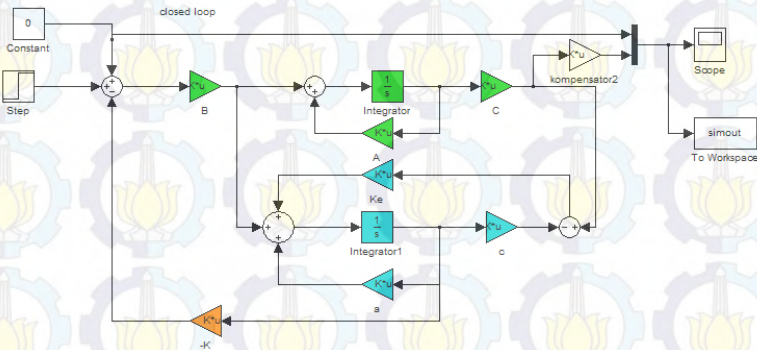
### MODEL SIMULASI OPEN LOOP & CLOSED LOOP



*Open loop model state-space platform*

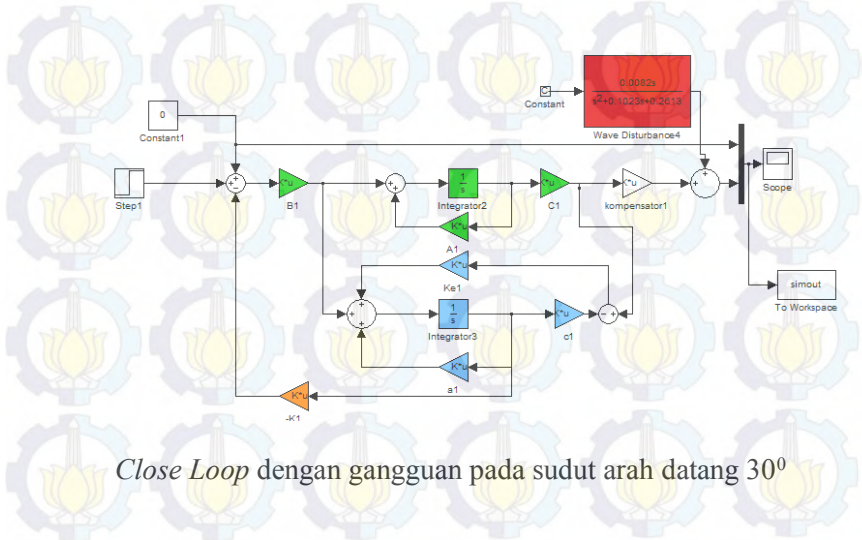
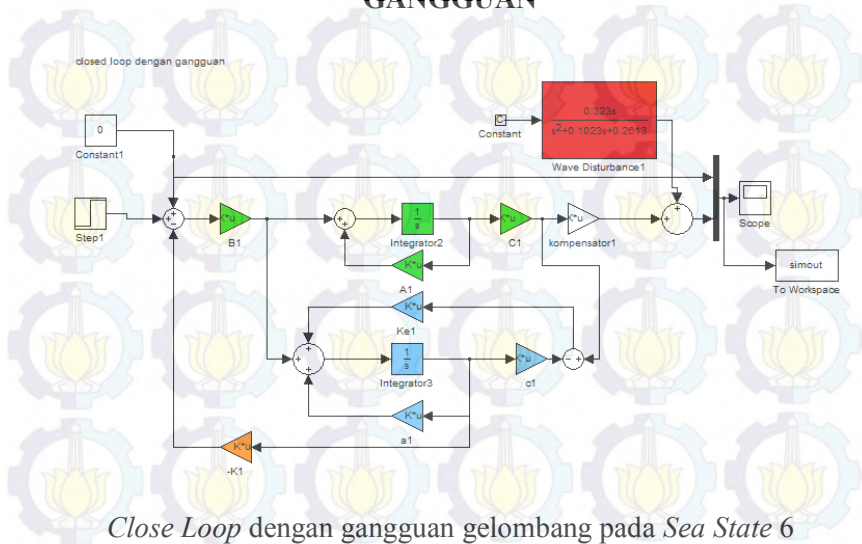


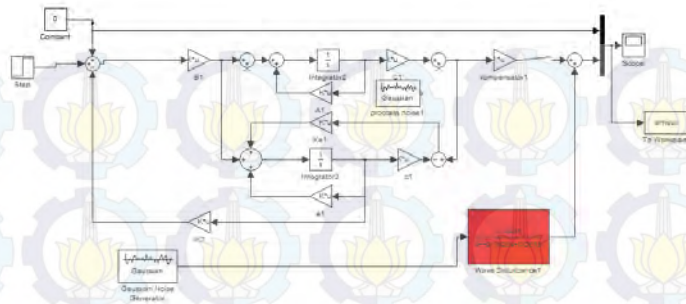
*Close loop model uji Respon Sway*



*Close loop model uji Respon Yaw*

## MODEL SIMULASI KONTROL CLOSE LOOP DENGAN GANGGUAN





*Close Loop dengan gangguan Gaussian*

